物理学的进化

[美] 阿尔伯特·爱因斯坦 [波兰] 利奥波德·英费尔德——著

Albert Einstein | Leopold Infeld

The Evolution of Physics

中信出版集团

周肇威——译

版权信息

书名:物理学的进化

作者:[美]阿尔伯特·爱因斯坦 [波兰]利奥波德·英费尔德

译者:周肇威

ISBN:9787521701418

中信出版集团制作发行

原序

在开始阅读以前，你一定期望我们回答几个简单的问题：写这本书的目的是什么？它是为什么样的读者写的？

一开始便要明确地回答这些问题是很困难的。如果在你读完本书后来回答便会容易得多，但到那时候这又将是多余的了。我们觉得，说这本书没有什么企图倒简单些。我们不是在编写物理学教科书。这里没有系统地讲述基本物理论据和理论。说得更恰当一些，我们的目的在于用粗线条描绘出人类如何寻找观念世界和现象世界的联系。我们试图说明是什么样的一种动力迫使科学建立起符合客观实在的观念。但是，我们的叙述必须简单。我们应当选择那些我们认为是最有特色和最有意义的重要路径来穿过论据和概念的迷宫。那些不在我们选择的道路上的论据和理论，我们都把它们略去了。本书的总的任务是叙述物理学的进化，因此我们不得不对论据和观念做一定的选择。一个问题的重要性不应该根据它所占的篇幅来判断。有几种主要的思想方法没有得到反映，这并不是因为它们不重要，而是因为它们不在我们所选择的路径上。

在写这本书的时候，关于我们所想象的读者的特征，我们曾做过很长时间的讨论，并且处处都在替他着想。我们想象他完全缺乏物理学和数学的实际知识，但是却具有很强的理解能力，足以弥补这些缺憾。我们认为他对物理学和哲学的观念很感兴趣，同时他对努力钻研书中比较乏味和困难的部分很有耐性。他认识到，要理解任何一页，必须细读前面的每一页。他也知道，即使是一本通俗的科学书，也不能像读小说一样去读它。

这本书是你我之间的亲切的交谈。你也许会觉得它讨厌或有趣、枯

燥或令人激动，但是，如果本书能使你多少知道一些人类有发明能力和智力，以及人们为了更完善地了解、掌握物理现象的规律所进行的无穷尽的努力，我们的目的便达到了。

阿尔伯特·爱因斯坦
利奥波德·英费尔德

1
机械观的兴起

奥妙的侦探故事

我们设想有一个完美的侦探故事。这个故事告诉我们所有重要的线索，使我们不能不提出自己对事件真相的见解。如果我们仔细研究故事的构思，不要等作者在书的结尾做出交代，我们早已得到完满的解答了。只要不是低劣的侦探故事，这个解答就不会使我们落空；不但如此，它还会在我们期待它的一刹那立刻出现。

我们是不是可以把一代又一代不断地在自然界的书里发现秘密的科学家比作读这样一本侦探小说的人呢？这个比喻是不确切的，以后得放弃它，但是它多少有些比得恰当的地方，它应当被加以扩充和修改，以便更适于识破宇宙秘密的科学企图。

这个奥妙的侦探故事，至今还没有被解答。我们甚至不能肯定它是

否有一个最后的答案。但是，阅读这本书已使我们得到许多收获。它教会了我们自然界的基本语言。它使我们了解到许多线索，而且它是科学的历次艰苦发展中精神愉快和奋发的源泉。但是我们体会到，尽管读过和研究过的卷帙已经不少了，但如果肯定有一个答案的话，那我们离最后的答案还很远。在每一个阶段，我们都想找出一个能符合已发现的线索的解释。我们所接受的各种推测性的理论虽然说明了许多情况，但是还没有引申出符合所有已知线索的一般解。往往有一个看来似乎很圆满的理论，但是进一步来读就发现它还是不适当的。新的情况出现了，它们跟旧的理论相互矛盾，或者不能用旧的理论解释它们。我们读的愈多，对这本书的理解也就愈充分；虽然我们不断地往前迈进，但是圆满的解答却似乎在不断地向后退。

从柯南道尔[注]写出动人的故事以来，几乎所有的侦探小说都是这样开始的：侦探首先搜集他所需要的，至少是他的问题的某一方面所需要的一切事件。这些事件往往是很奇怪的、不连贯的，并且是毫不相关的。可是这个大侦探知道这时不需要再继续侦查了，只要用纯粹的思维把所有搜集起来的事件连贯起来。于是他拉拉小提琴，或者躺在安乐椅上抽抽烟。突然间，他灵机一动，就找到了事件之间的关系。他现在不仅能解释现有的线索，而且知道还有其他许多事件一定也已经发生。因为现在他已十分准确地知道在哪里可以找到它，如果他愿意的话，他可以出去收集他的理论的进一步证明。

我们再来一句老生常谈：科学家读自然之书必须由他自己来寻找答案，他不能像某些无耐性的读者在读侦探小说时常做的那样，翻到书末先去看最后的结局。在这里，他既是读者，又是侦探，他得找寻和解释（哪怕是部分地）各个事件之间的联系。即使是为了部分地解决这个问题，科学家也必须搜集漫无秩序地出现的事件，并且用创造性的想象力去理解和连贯它们。

在下面的叙述中，我们的目的是用粗线条的轮廓说明物理学家的工作必须像侦探那样用纯粹的思维来进行。我们主要是叙述思维和观念在

探求客观世界的知识中所起的作用。

第一个线索

人类自有思想以来，便想读这本奥妙的侦探故事。但是直到三百多年以前，科学家才开始懂得这个故事的语言。从那个时代，即伽利略和牛顿的时代起，这本书就读得快多了。侦查技术、有系统地寻求线索和了解线索的方法都发展了。某些自然之谜已经被解开了，但是进一步研究之后，人们发现，其中有许多只是暂时的和表面上的解答。

有一个基本问题，几千年来都因太复杂而含糊不清，那就是运动的问题。我们在自然界中所见到的各种运动，例如抛到空中的石子的运动，在海上航行的轮船的运动，在街上行驶的车子的运动，事实上都是很复杂的。为了了解这些现象，最好从最简单的例子着手，然后逐渐研究更复杂的例子。设想有一个静止的物体，没有任何运动。要改变这样一个物体的位置，必须使它受力，例如推它、提它，或由其他的物体，例如马、蒸汽机作用于它。我们的直觉认为运动是与推、提、拉等动作相连的。多次的经验使我们进一步深信，要使一个物体运动得更快，必须用更大的力推它。结论好像是很自然的：对一个物体的作用愈强，它的速度就愈大。一辆四匹马拉的车比一辆两匹马拉的车运动得快一些。因此，直觉告诉我们，速率主要是跟作用有关。

凡是读过侦探小说的人都知道，一个错误的线索，往往把情节弄糊涂了，以致迟迟得不到解决。凭直觉的推理方法是不可靠的，它导致了对运动的虚假观念，这个观念竟然保持了很多个世纪。亚里士多德在整个欧洲享有至高无上的威望，这可能是人们长期相信这个直觉观念的主要原因。在两千年来公认为是他所写的**《力学》**（*Mechanics*）中，我们读到：

推一个物体的力不再去推它时，原来运动的物体便归于静止。

伽利略的发现以及他所应用的科学的推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。这个发现告诉我们，根据直接观察所得出的直觉的结论常常是不可靠的，因为它们有时会导致错误的线索。

但是，直觉错在哪里呢？说一辆四匹马拉的车比一辆两匹马拉的车走得快些难道还会有错吗？

让我们更加严格地来检查运动的基本论据，先从简单的日常经验检查起，这些经验是人类自开化以来就已熟悉了的，而且是在为了生存而做的剧烈的斗争中得来的。

假如有人推着一辆小车在平路上行走，然后突然停止推那辆小车。小车不会立刻静止，它还会继续运动一段很短的距离。我们问：怎样才能增加这段距离呢？这有许多办法，例如在车轮上涂油、把路修得很平滑等。车轮转动得愈容易、路愈平滑，车就可以继续运动得愈远。但是，在车轮上涂油和把路修平有什么作用呢？只有一种作用：外部的影响减小了，即车轮里以及车轮与路之间的那种所谓的摩擦力的影响减小了。这已经是对观察得到的现象的一种理论解释，实际上，这个解释还是武断的。再往前检查一下，我们便将得到正确的线索。假想路是绝对平滑的，而车轮也毫无摩擦，那么就没有什么东西阻止小车，而它就会永远运动下去。这个结论是从一个理想实验中得来的，而这个实验实际上是永远无法做到的，因为不可能把所有的外界影响都消除。这个理想实验指出了真正建立运动的力学基础的线索。

比较一下对待这个问题的两种方法，我们可以说，根据直觉的观念是这样的：作用愈大，速度便愈大。因此速度本身表明有没有外力作用于物体之上。伽利略所发现的新线索是：一个物体，假如既没有人去推它、拉它，也没有人用别的方法去作用于它，或者简单些说，假如没有外力作用于它，此物体将均匀地运动，即沿一条直线永远以同样的速度

运动下去。因此，速度本身并不表明有没有外力作用于物体上。隔了一代以后，牛顿将伽利略这个正确的结论表述成了惯性定律。这个定律通常是我们在学校里开始学习物理学时牢记在心的第一条定律，我们有许多人还能记得它：

> 任何物体，只要没有外力改变它的状态，便会永远保持静止或匀速直线运动的状态。

我们已经知道，这个惯性定律不能直接由实验得出，只能根据思索和观察得出。理想实验无论什么时候都是不能实现的，但它使我们对实际的实验有深刻的理解。

从我们周围各式各样的复杂运动中，我们选匀速直线运动作为第一个例子。这是最简单的运动，因为没有外力作用于运动物体之上。可是匀速直线运动是永远不能实现的，从塔上抛下石子、在平路上推动车子都绝不能实现绝对匀速的运动，因为我们不能完全消除外力的影响。

在好的侦探故事中，一些最明显的线索往往会引导到错误的猜疑上去。同样地，在力图理解自然规律时，我们发现，最明显的直觉的解释往往是错的。

人的思维创造出一个一直在改变的宇宙图景。伽利略对科学的贡献就在于毁灭直觉的观点而用新的观点来代替它。这就是伽利略的发现的重要意义。

但是关于运动的另一个问题马上出现了。假如速度不表示作用于物体上的外力，那么什么才是呢？伽利略发现了这个问题的答案，而牛顿又把这个问题回答得更为精确；它成了我们侦查中的另一个线索。

为了得到一个正确的答案，我们必须更深入一些想想在绝对平滑的道路上的小车。在我们的理想实验中，运动的均匀性是由于没有任何外力。现在我们设想有人把这辆匀速运动着的小车朝它的运动方向推一

下。这时会发生什么呢？很明显，它的速率会增大。同样很明显，如果朝相反于运动的方向推一下，则它的速率会减小。在前面的例子中，小车因被推而加速；在后面的例子中，小车因被推而减速。由此可以立刻得出一个结论：外力的作用改变了速度。因此，速度本身不是推和拉的结果，而速度的改变才是。一个力究竟是使速度增加还是使速度减小，完全看它是朝着运动的方向而作用还是相反于运动的方向而作用。伽利略清楚地看到了这一点，并且在他的著作《两种新科学》（*Two New Sciences*）中写下了这样的话：

> ……一个运动的物体假如有了某种速度以后，只要没有增加或减小速度的外部原因，便会始终保持这种速度——这个条件只有在水平的平面上才有可能，因为在沿斜面运动的情况中，朝下运动已经有了加速的起因，而朝上运动则已经有了减速的起因。由此可知，只有水平的平面上的运动才是不变的，因为假如速度是不变的，运动不会减小或减弱，更不会消灭。

沿着这条正确的线索进行研究，我们对运动的问题就有了比较深刻的了解。因此牛顿提出的经典力学是以力与速度改变之间的联系为基础，而不是以人们直觉所想的力与速度本身之间的联系为基础的。

我们已经应用了在经典力学中起主要作用的两个概念：力和速度的改变。在科学的进一步发展中，这两个概念都已经被扩充和推广了。因此，我们必须更加细致地考察它们。

力是什么呢？在直觉上，我们意识到这个名词的意义。这个概念是从做推、抛、拉等动作的筋肉感觉而兴起的。但是，这个概念所概括的远远不止这些简单的例子。我们可以想想另一些力，它们不能被想象成马拉车那样简单。我们讲的是太阳与地球间、地球与月球间的引力，正是这种力造成了潮汐现象。我们讲的是地球把我们和我们周围所有的物体都限制在它的影响范围内的力，以及产生海浪和吹动树叶的风力。我

们随时随地只要看到速度的改变，在一般意义上，它一定是由外力引起的。牛顿在他的《原理》（*Principia*）中写道：

> 外加力是加在物体上用以改变它的静止或匀速直线运动状态的一种作用。
>
> 这个力只存在于作用中，一旦作用过去了，物体中便再没有力了。因为物体可以保持它所得到的任何一种新的状态，这仅仅依靠惯性就可以做到。作用力有不同的来源，例如打击、压缩和向心力等。

假如一颗石子从塔顶掉下来，它的运动不是等速的；速度随着石子的下降而增加。我们断定：朝向运动的方向上有外力作用，换句话说，地球在吸引石子。我们再来举个例子。把石子往上直抛，会发生什么情况呢？它的速度逐渐降低，等到它到达最高点时就开始下坠。上抛物体的减速和下坠物体的加速是由同一个力引起的。不过在一种情况中是力朝着运动的方向而作用，而在另一种情况中是力相反于运动的方向而作用。力只有一种，它造成加速或减速，全看石子是下坠还是上抛。

矢量

我们在上面所说的所有运动都是**直线的**，也就是沿着一条直线运动。现在，我们必须再往前走一步。我们要理解自然规律，应该先分析最简单的情况，在最初阶段先放下较复杂的情况。直线比曲线简单。但是，仅了解直线运动是不够的。月球、地球和行星的运动正是那些成功应用力学原理的运动，它们都是沿着曲线轨道的运动。从直线运动过渡到曲线运动会遇到许多新的困难。如果我们要理解经典力学的原理，就

必须有勇气克服这些困难。经典力学给了我们第一个线索，因而它成为科学发展的起点。

我们再来考察另一个理想实验。设想有一个完全圆滑的球在平滑的桌子上滚动。我们知道，假如推一下这个球，也就是说，如果对它施加外力，那么它的速度就会改变。现在假定跟前面小车的例子中所说的不同，推的方向不是和运动的方向在一条路线上。假定推力朝着另一个方向，譬如跟这个路线垂直。结果球会发生什么情况呢？运动可区分为三个不同的阶段：初始的运动、施加外力和外力停止作用后的后期运动。根据惯性定律，在外力作用以前和以后，速度都是绝对均匀的。但是外力作用以前和以后的匀速运动之间有区别：方向改变了。球的初始运动的路线和外力作用的方向是相互垂直的。后期的运动完全不在这两条直线的任何一条上，而在它们二者之间。如果推力强而初速度小，那么它就靠近力的方向；如果推力小而初速度大，那么它就靠近初始运动的路线。我们根据惯性定律所得到的新结论是：一般说来，外力的作用不仅改变速率，还改变运动的方向。对这个事实的理解使我们为物理学中引入**矢量**这个概念做好了准备。

我们可以继续应用直接的推理方法，思想的出发点仍然是伽利略的惯性定律。我们还可以应用这个在解决运动的难题中极有价值的线索从而推出许多结论来。

让我们观察在平滑的桌子上朝不同方向运动的两个球。为了想象得清楚些，假定这两个方向是相互垂直的。因为没有任何外力，所以球的运动是绝对均匀的。再假定它们的速率也相等，即这两个球在相同的时间间隔内经过相同的距离。但如果说这两个球具有相同的速度是否正确呢？可以答是，也可以答否！假使两辆汽车的速率计上都表示每小时40英里[注]，我们通常便说它们的速率或速度相等，而不管它们是朝哪一个方向行驶的。但科学必须创造自己的语言和自己的概念，供它本身使用。科学的概念最初总是日常生活中所用的普通概念，但它们经过发展就完全不同了。它们已经被改变了，并失去了普通语言中所带有的含糊

性质，从而获得了严格的定义，这样它们就能被应用于科学的思维。

根据物理学家的观点，这样说更合适：朝不同方向运动的两个球的速度是不同的。虽然这纯粹是习惯上的说法，但这样说更为方便：从同一点出发、沿不同的道路行驶的四辆汽车，尽管速率计上所记录的速率都是每小时40英里，但它们的速度是不同的。速率（只考虑绝对值）和速度（还考虑方向）的区别说明物理学如何从日常生活的概念出发，然后把它加以改变，使它更适于科学的进一步发展。

如果长度已经被测量出来，那么这个结果可以用若干单位来表示。一根棍的长度也许是3英尺[注]7英寸[注]，某件东西的重量也许是2磅[注]3盎司[注]，而时间间隔则是多少分多少秒。在每一种情况中，测量的结果都是用一个数来表示的。但是单用一个数还不足以表示某些物理概念。认识到这一点是科学研究中的一大进步。例如对表示速度来说，方向和大小都是同样重要的。既有数值又有方向的这种量被称为**矢量**。表示它的符号通常是一根箭。速度就可以用一根箭来表示。更简单地说，速度是用矢量来表示的，它的长度是某种选定单位的长度的若干倍，用以表示速度的数值，它的方向就是运动的方向。

如果四辆汽车从同一点以相同的速率四向出发，那么它们的速度可以用等长的四根箭来表示，就像图1中所画的那样。图中所用的比例尺是1英寸表示每小时40英里。用这种方法，任一速度都可用一个矢量来表示；反过来，如果比例尺已知，那么根据这种矢量图就可以确定速度。

如果两辆汽车在马路上相擦而过，并且速率计上表示的都是每小时40英里，那么我们用箭头指向相反方向的两根箭来表示这两个不同的矢量（图2）。这正如纽约地铁指示“上行”和“下行”的箭头应该用相反的方向一样。不过所有上行的火车不论经过哪个车站或在哪一条线路上行驶，只要速率相同，都有相同的速度，它们可以只用一个矢量来表示。矢量并没有说明火车经过哪一个站或者它沿着许多平行轨道中的哪一条在行驶。换句话说，在习惯上，所有像图3中所画的矢量都可以被认为

是相等的；它们或者是处在同一直线上，或者是相互平行，因此它们具有朝着相同方向的箭头。图4表示不同的矢量，它们或者长度不同，或者方向不同，或者长度和方向都不同。这四个矢量还可以用另一种方法来画，使它们都从同一点出发（图5）。因为出发点是无关紧要的，所以这些矢量既可以表示从同一地点开出的四辆汽车的速度，也可以表示在不同地方以指定的速率和方向开行的四辆汽车的速度。

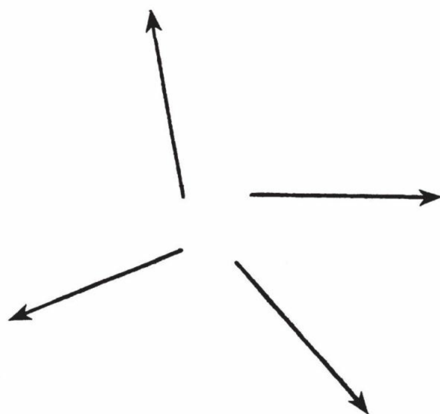


图1

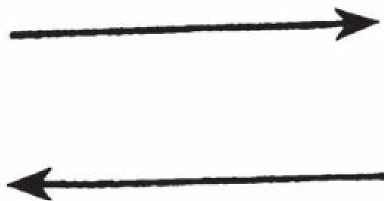


图2

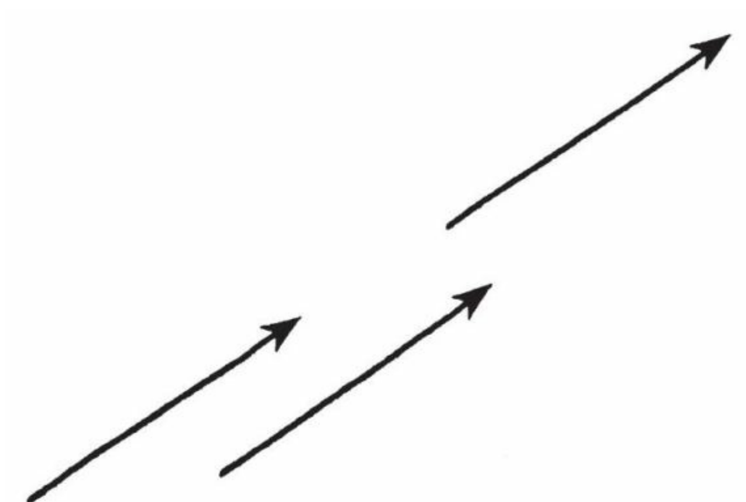


图3

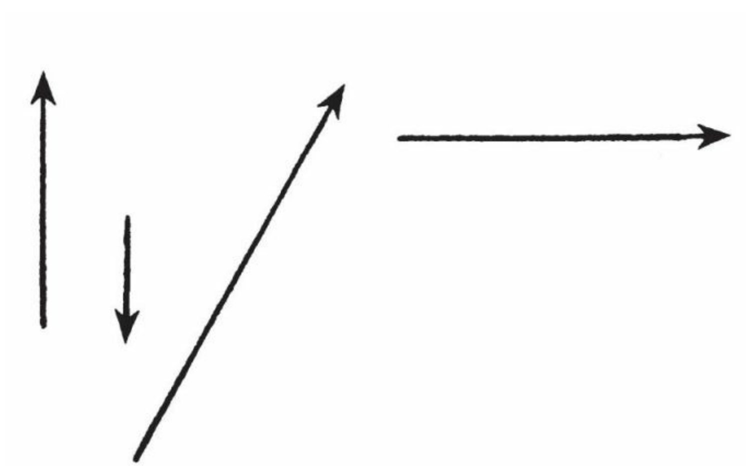


图4

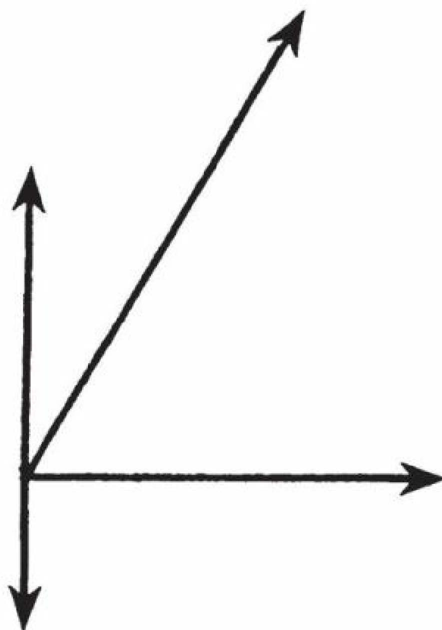


图5

现在就可以用这种矢量图来描写前面已经讨论过的直线运动的情况。我们说过：沿着直线做匀速运动的小车，只要朝着它运动的方向推它一下，就会增加它的速度。若用图来表示，这可以被画成两个矢量：短的那根表示推以前的速度，而长的一根和前者有相同的方向，表示推以后的速度（图6）。虚线矢量的意义是很清楚的，它代表因推而产生的速度的变化。而在力的方向和运动的方向相反，运动缓慢下去的情况下，图又稍有不同了。虚线的矢量仍表示速度的改变，但在这种情况下，它的方向却不同（图7）。很明显，不但是速度本身，而且速度的变化也都是矢量。但是任何一个速度的变化都是由外力引起的，因此力也必须用一个矢量来表示。为了表示一个力，光说我们用多大的劲儿推小车是不够的，还应说明我们朝哪一个方向推。正如速度和速度的改变一样，力不能仅用一个数来表示，而应当用一个矢量来表示。因此外力也是一个矢量，而且一定跟速度改变的方向相同。在图6、图7中，虚线的矢量既表明力的方向，也表明速度改变的方向。

这里怀疑论者也许会说，他看不出引入矢量有什么好处，以上所完

成的无非是把早已知道的论据翻译成一种不通俗的复杂的语言而已。在这个阶段，确实很难使怀疑论者相信他们是错误的。实际上，目前他们暂时是对的。但是我们将要看到，正是这种奇怪的语言引起了重要的推广，其中矢量就显示了它的重要性。

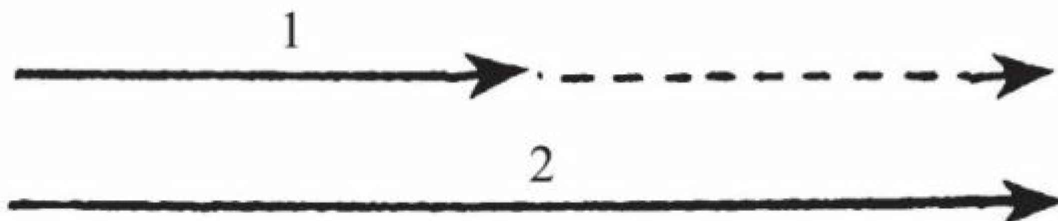


图6



图7

运动之谜

以上我们只谈了直线运动，还远远没有理解在自然界中所观察到的许多运动。我们必须考察曲线运动，下一步我们就来确定主宰这些运动的定律。这是一件很不容易的事情。在直线运动的情况中，速度、速度的改变、力等概念是很有用的。但是，我们不能立刻看出怎样能把它们应用到曲线运动中去。甚至我们可以想象老的概念已不适于描述一般运动，因而需要创造新的概念。我们应该循着旧路走，还是应该另找一条新路走呢？

把概念加以推广是科学上常用的办法。推广的方法不一定只有一种，通常有很多种。但是不管是哪一种推广，都必须严格地满足一个要求：假如原来的条件完备时，被推广了的概念必须化成原来的概念。

我们可以用目前所讨论的例子来很好地说明这个意义。我们可以首先试着把速度、速度的改变和力等概念推广到沿曲线而运动的情况中去。在科学术语中，当我们讲到曲线的时候，已把直线包括进去了。直线是曲线的一种特殊的、平凡的例子。因此，如果速度、速度的改变和力被引入曲线运动，那么它们就自发地被引入直线运动。但是这个结果不应跟以前所得到的结果相互矛盾。如果曲线变成直线，那么所有被推广了的概念都必须化成描述直线运动的已熟知的概念。但是要唯一地确定这个推广，这样一个限制是不够的。根据这个限制来推广一个概念，还存在很多种可能性。科学的史实指出，即使最简单的推广也有时成功，有时失败。我们必须首先做一个猜测。在目前这个例子里，很容易猜出正确的推广方法。新的、被推广了的概念是非常成功的，它既帮助我们理解抛在空中的石子的运动，还帮助我们理解行星的运动。

“速度”、“速度的改变”和“力”在曲线运动的普遍情况里表示什么意思呢？我们首先说速度。如果一个很小的物体沿着曲线从左至右运动。这样的小物体通常被称为一个**质点**。在图8中，曲线上的点表示质点在某个时刻的位置。在这个时刻和这个位置的速度是怎样的呢？伽利略的线索又指引我们走向引出速度的那条路上去。我们必须再一次发挥我们的想象力去想象一个理想实验。质点在外力的影响下沿着曲线从左至右运动。我们想象在给定的时间以及在图9上的点所表示的位置上，所有的外力突然都停止作用了。那么，根据惯性定律，运动应当是匀速直线的。实际上，我们自然不能使物体完全不受外界的影响。我们只能做这样的推测：“假使……结果会怎样？”再根据这样推测所得出的结论来判断我们的推测是否恰当，而且根据这些结论是否和实验相符来判断。

图10中的矢量表示当外力消失时所猜测的匀速运动的方向。这就是所谓的切线方向。通过显微镜来看运动着的质点，人们可以看见曲线的

很小部分，它显示为很小的直线段。切线就是它的延长线。因此，图上画出来的矢量就代表在给定时刻的速度。速度矢量就在切线上。它的长度就代表速度的数值，就像代表汽车的速率计上所表示的速率一样。



图8



图9

我们的理想实验是通过破坏运动来寻求速度矢量，但这种实验不能太当真。它只是帮助我们懂得应该把什么东西称为速度矢量，并使我们能在给定的地点和时间确定速度矢量。

图10中画着一个质点沿一根曲线运动时在三个不同位置上的速度矢量。在这个例子中，不仅速度的方向，而且速度的数值（如矢量的长度所示），在运动中都是时刻在变化的。

这个新的速度概念是否满足在一切推广中所提出的要求呢？换句话说：假使曲线变成了直线，它是否也简化为以前的速度概念呢？很明显，确实是这样的。直线的切线就是这条直线本身。速度矢量就隐伏在运动的线路上，正如运动着的小车和滚着的圆球的情况一样。

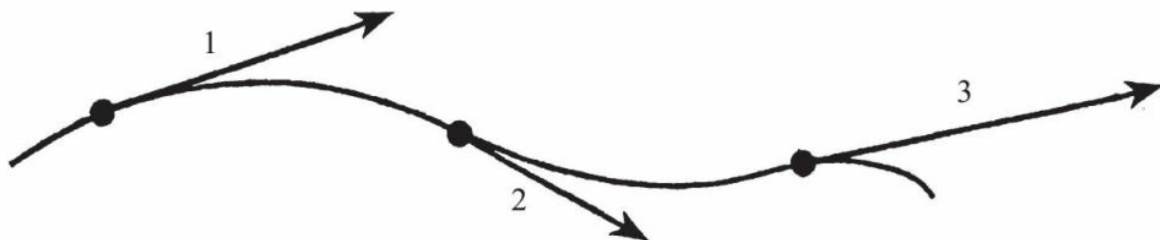


图10

接下来要介绍沿着曲线运动的质点的速度的改变。这也可以有各种不同的方法，我们选择其中最简单和最方便的。图10中画出的几个速度矢量代表路线上各不同点上的运动。其中前面两个矢量可以画成从同一点出发（图11）。我们已经知道，对矢量来说，这样做是可以的。我们把虚线表示的矢量称为“速度的改变”。它的起点是第一个矢量的末端，而终点是第二个矢量的末端。乍一看，这个速度的改变的定义似乎不真实而且没有意义。在矢量1和2的方向相同这一特殊情况中，这个定义就非常清楚了（图12）。自然，这又回到直线运动上去了。如果这两个矢量具有相同的起点，那么虚线的矢量仍然是把它们的终点连接起来。图12和图6完全相同，而以前的概念便成了新概念的一种特殊情况。应该指出，在图中把两条线分开是因为假如不这样的话，它们就重合在一起，分辨不出来了。



图11

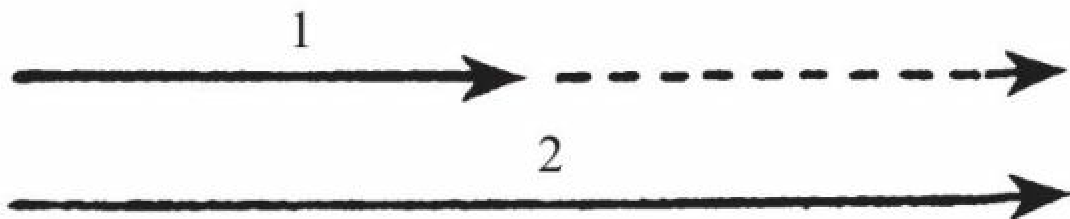


图12

现在我们来进行推广的最后一步。到目前为止，在我们所做的猜测中，这将是最重要的一个。力和速度的改变之间的联系必须这样建立起来：它能够使我们找出一个线索来了解运动的普遍问题。

解释直线运动的线索是非常简单的：外力导致了速度的改变；外力的矢量的方向跟速度改变的方向相同。然而现在应该把什么看作曲线运动的线索呢？完全一样！仅有的差别是现在速度的改变的意义比以前更大了。我们只要看一下图11和图12中的虚线矢量，就能清楚地得到启示。如果曲线上的每一点的速度都已知道，那么每一点的力的方向便可以立刻找出来。我们必须取时间间隔极小的两个时刻，因而相应的两个位置也极近，把这两根速度矢量画出来。连接第一根矢量的末端与第二根矢量的末端的这根矢量表示作用力的方向。但是重要的是，两根速度矢量只能并必须是由“极短”的时间间隔来分隔。对“极近”“极短”这一类词义做严格的分析是非常不容易的。就是这样的分析使牛顿和莱布尼茨发明了微积分。

把伽利略的线索加以推广的过程是冗长而曲折的。我们在这里不能叙述这个推广的结果是如何丰富和有益。用上它以后，许多在过去互不关联的和不能理解的事情都得到了简单而又圆满的解释。

从各种各样的运动中，我们只选择最简单的，并应用刚才所表述的定律来解释它。

枪筒里射出来的子弹、斜向地抛出去的石子、水管里射出来的一股水，它们所经行的路线都走成大家所熟知的抛物线。设想在石子上附加

一个速率计，那么石子在任何时刻的速度矢量都可以被画出来。这一结果在图13中被充分地表示出来了。作用在石子上的力的方向就是速度的改变的方向，而我们已经知道怎样可以决定它。图14中指出了作用在石子上的力是垂直的，且朝下。这正和我们使石子从塔顶上掉下时完全一样。路线和速度都完全不同了，但是速度改变的方向却都是相同的，那就是，它们都朝向地球的中心。

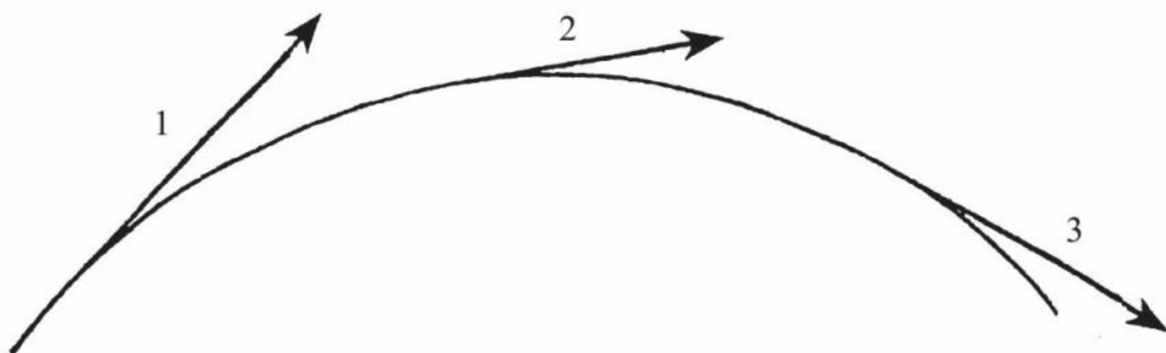


图13



图14

把一个石子拴在一根绳子的末端，并在水平面上挥动它，它就沿着圆周运动。如果速率不变，那么表示这种运动的图中所有的矢量的长度都相等（图15）。然而速度矢量不断地在改变，因为运动的路径不是直线的。只有在匀速直线运动中才没有任何外力的作用。然而，这里速度不是在数值方面改变，而是在方向方面改变。根据运动定律，这种改变

必定是由某些外力引起，而在这个例子中则是由作用于石子跟握绳的手之间的外力引起的。于是立刻又产生了一个问题：力在哪一个方向上作用呢？再用矢量图来回答。如图16所示，把两个非常靠近的点的速度矢量画出来，这样就可以找到速度的改变。可以看出，这个矢量沿着绳子朝向圆周的中心，并且永远是跟速度矢量或切线相垂直的。换句话说，手通过绳子对石子加了一个力。

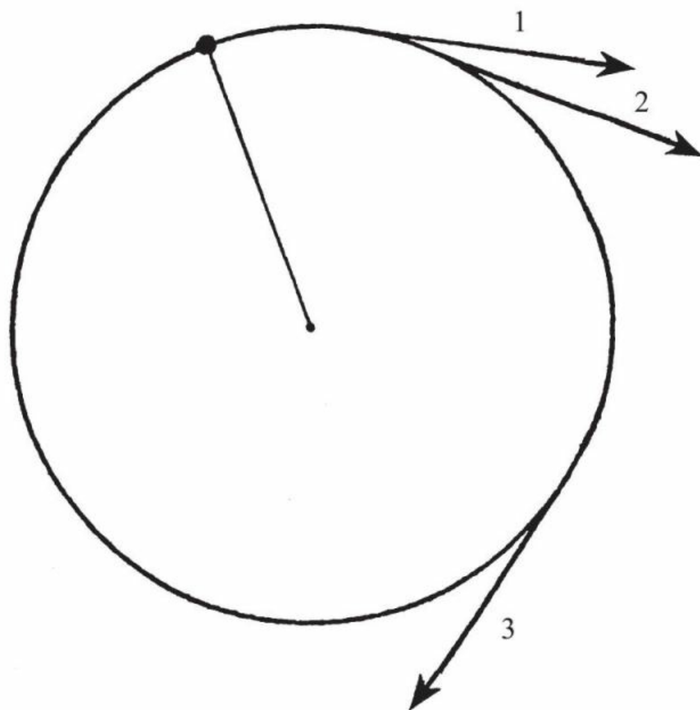


图15

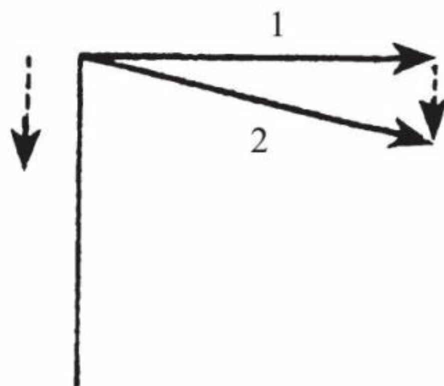


图16

月球围绕地球的转动便是和这完全相似的更重要的一个例子。月球绕地球的转动可以被近似地认为是匀速圆周运动。作用在月球上的力是指向地球的，这和前例中力是朝向手的道理一样。地球与月球并没有用绳连接起来，但是我们可以想象在两个物体的中心之间有一根线，力便在这根线上，并朝向地球的中心，这正如石子被抛向空中或从塔顶落下时的力一样。

前面我们对运动所说的一切，可以用一句话总括起来。**力与速度的改变是方向相同的矢量**。这是运动问题的初始的线索，然而它必然尚不足以彻底解释一切被观察到的运动。从亚里士多德的思想方法转变到伽利略的思想方法，已经成为奠定科学基础的最重要的一块奠基石。这个转机一旦实现，以后发展的路线就很清楚了。这里我们只注重发展的最初阶段，即注重研究最初的线索来指出新的物理概念在与旧概念的坚决斗争中是如何产生的。我们只提到科学上的开辟工作，包括寻找新的和未预见到的科学发展道路，以及能创造出一个永远变化着的宇宙图景的科学思想的奇迹。最初和最基本的步骤总是带有革命性的。科学的想象力发现旧的概念太狭窄了，于是用新的概念去代替它。沿着已经开辟了的任何一种思想路线而继续发展，在到达下一个需要去征服的新领域的转折点以前，是带有进化性的。可是为了了解哪些原因和哪些困难迫使我们改变根本的概念，我们不仅要知道最初的线索，而且要知道从这些线索中可以推出什么结论。

现代物理学最重要的特征之一是：从最初的线索推出来的结论，不仅是定性的，而且是定量的。我们重新来研究从塔上掉下来的石子。我们已经知道，石子愈往下掉，它的速度愈增加。但是我们还要知道得更多一些。这个改变正好多大呢？在它开始掉下来以后的任何一个时刻，石子的位置和速度是怎样的呢？我们希望能够预言事件的结果，并且用实验来决定观察的结果是否能确认这些预言，是否能确认最初的假设。

要得出定量的结论，我们必须运用数学的语言。科学的最基本的观

念，按其本质来说，大都是简单的。因此，一般说来，可以用一种每一个人都能懂的语言来表达。但是要领悟这些观念，需要极高深的侦查技术知识。如果我们要推导出能和实验结果做比较的结论，必须用数学作为推理的工具。由于本书只讨论基本的物理学观念，我们可以避免数学的语言。因为在本书中我们一贯避免数学，所以为了了解在进一步发展中所产生的重要线索，我们有时必须限制自己只引用未加证明的一些结果。放弃数学语言所必须付出的代价，便是要失去一些精确性，而且有时得引用一些结果，却不能说明它们的由来。

运动的一个非常重要的例子就是地球围绕太阳的运动（图17）。大家都知道，它运动的路线是一个被称为椭圆的闭合曲线。做出速度的改变的矢量图证明了作用在地球上的力指向太阳。但是无论如何，仅有这一点知识是不够的。我们希望能预言太阳及其他行星在任何时刻的位置。我们希望能预言下一次日食的日期和时间以及许多天文现象。所有这些事都能做到，但不是单靠最初的线索就够了，因为现在不仅要知道力的方向，还要知道力的绝对值，即它的数值。牛顿在这方面做了一个富有想象力的猜测。根据他的**引力定律**，两个物体之间的引力跟它们彼此间的距离有一种很简单的关系：当距离增加时，力便减小。再说得明确些，就是当距离增加2倍，力便减小到原来的1/4，当距离增加3倍，力便减小到原来的1/9。

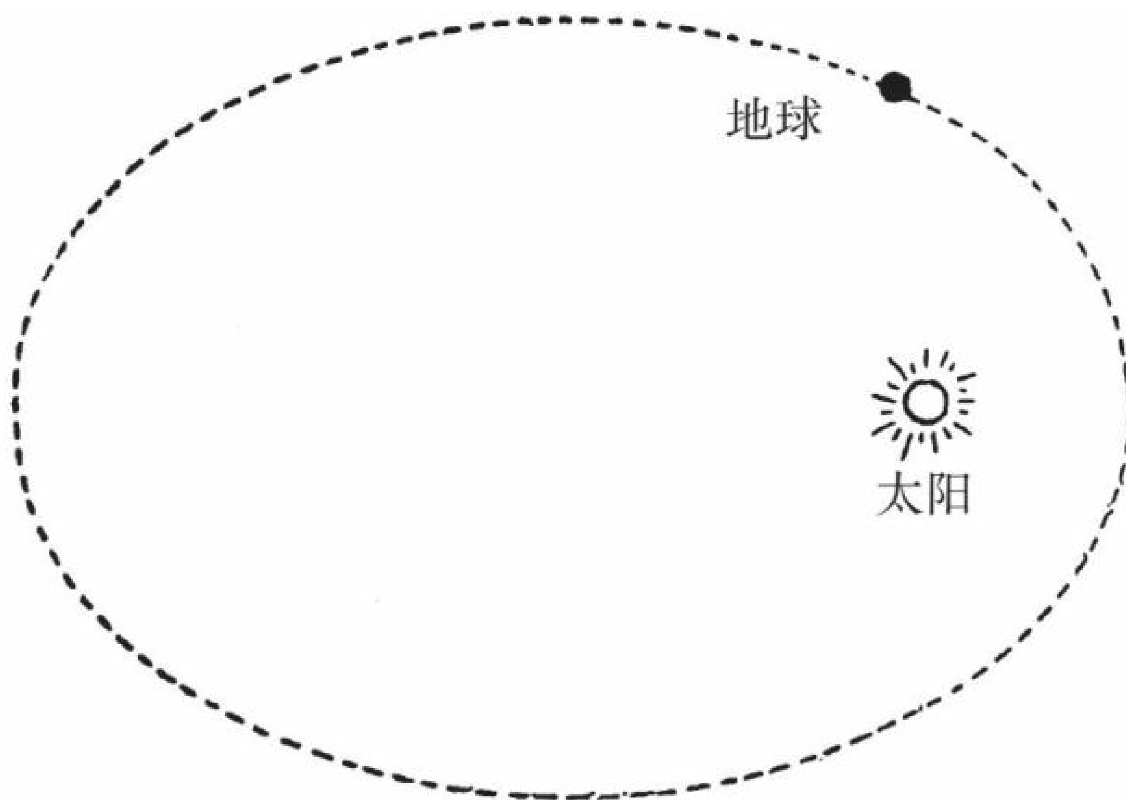


图17

由此可知，在万有引力方面，我们能够用很简单的形式把运动物体之间的力跟距离的关系表示出来。在所有其他场合遇到的各种不同的力，例如电力、磁力之类的作用时，我们也以同样的方法处理。对于力，我们想用一种简单的表达方式来解释。这种表达方式是否恰当，只要看从它推断出来的结论是否为实验所确认。

但是，单有引力的知识还不足以描述行星的运动。我们已经知道，表示很短时间间隔内的力和速度的改变的矢量方向是相同的，但是我们必须再往前追随牛顿一步，假定它们的长度之间有一种简单的关系。如果所给的其他一切条件都相同，就是说，同一个运动的物体，而且通过相同的时间间隔来考察速度的改变，那么，按照牛顿的说法，速度的改变与力成正比。

因此为了得出关于行星运动的定量的结论，需要两个补充的猜测。一个是一般性质的，说明力和速度改变之间的关系。另一个是特殊性质

的，说明这种特殊形式的力和物体之间的距离的关系。第一个就是牛顿的运动的普遍定律，第二个是他的引力定律。两个定律合起来就能决定行星的运动。用下面听起来似乎很笨拙的一些推理就可以把这个意思弄清楚。假设我们能够测出行星在一定时刻的位置和速度，并且力也是已知的，那么，根据牛顿定律，我们便知道在非常短的时间间隔内的速度的改变。知道了初速度和速度的改变，我们就可以求出行星在这个时间间隔的末端时刻的速度和位置。连续地重复这个过程，我们就可以不必再求助于观察资料而把整个运动路线求出来。从原则上来说，这是力学上预言一个运动物体的经行路线的方法，但是用在这里是非常不合适的。在实用上，这种逐步进行的步骤是极端冗繁而且极不准确的。幸而这种方法完全是不必要的：数学给予我们一条捷径，并且使我们有可能准确地描述运动，而且所写的字比我们写一个句子的字还要少些。用这种方法所得到的结论可以用观察加以证明或推翻。

从石子在空中降落的运动以及月球在它的轨道上的转动中，还可以看出与上述同一类型的外力，那就是地球对物体的吸引力。牛顿认为：石子下降的运动、月球和行星的运动都是作用于任何两个物体之间的万有引力的特殊表现。在简单情况中，运动可以用数学加以描述和预言。在某些非常复杂的情况中，要牵涉许多物体相互之间的作用，数学的描述就不是那样简单了，但是基本的原理还是一样的。

我们觉得我们从最初的线索中推理而得的结论，现在已经在抛石子的运动中，在月球、地球和行星的运动中被证实了。

凡是要用实验来加以证明或推翻的结论实际上都是一些猜测罢了。没有一个假设可以从其他的假设中分离出来进行单独的实验。在行星围绕太阳运动的例子中，力学的体系已经获得很大的成就。可是我们很容易想象，建立在另一些假设基础上的另一个体系也可以同样得到成就。

物理学的概念是人类智力的自由创造，它不是（虽然表面上看来很像是）单独地由外在世界决定的。我们企图理解实在，多少有些像一个人想知道一个合上了表壳的表的内部机构。他看到表盘和正在走动着的

指针，甚至还可以听到嘀嗒声，但是他无法打开表壳。如果他是机智的，他可以画出一些能解答他所观察到的一切事物的机构图来，但是他却永远不能完全肯定他的图就是唯一可以解释他所观察到的一切事物的图形。他永远不能把这幅图跟实在的机构加以比较，甚至不能想象这种比较的可能性或有何意义。但是他完全相信：随着他的知识日益增长，他的关于实在的图景也会愈来愈简单，并且它所能解释的感觉印象的范围也会愈来愈广。他也可以相信，知识有一个理想的极限，而人类的智力正在逐步接近这个极限。他可以把这个理想的极限叫作客观真理。

还有一个线索

在最初研究力学的时候，人们会有这样一种印象，认为在这个科学分支中，一切都是简单的、基本的并且是永恒不变的。几乎没有人怀疑还存在一个重要的线索，三百年来，谁也没有注意过它。这个被人们忽略了的线索与力学的基本概念之一——质量有关。

我们再回过头来研究一辆小车在绝对平滑的路上运动那个简单的理想实验。假如小车最初是静止的，然后推它一下，之后它便以一定的速度匀速地运动。假定作用力可以重复任意多次，自然，产生推的作用的机构每次是以同样的方式，而且总以同样大小的力作用于同一辆车上。无论实验重复多少次，小车最后的速度总是一样的。但是如果把实验改变一下，车上最初是空的，现在让它装上东西，结果会怎样呢？重车的最后速度会比空车的小些。结论是：假如以同样一个力作用于两个不同的、原来静止的物体上，那么产生的速度将不一样。我们说，速度与物体的质量有关，质量愈大，速度愈小。

因此我们至少在理论上能知道如何决定物体的质量，或者更确切地说，怎样决定一个质量比另一个质量大多少倍。我们以同样大小的力作

用于两个静止的质量上，若发现第一个质量的速度三倍于第二个的速度，我们断定第一个质量是第二个质量的1/3。自然，这不是决定两个质量之比的一种很实用的方法。可是我们还可以想象，无论用这种方法或用以惯性定律为基础的其他类似方法，这总是能做到的。

我们实际上是怎样决定质量的呢？当然，不是用上面所描述的那种方法。每个人都知道这个正确的答案。我们把物体放在天平上称一下，就算决定了它的质量。

让我们把决定质量的这两种方法更仔细地讨论一下。

第一个实验跟重力，即地球的引力无关。小车在被推之后，就沿着绝对光滑的平面运动。重力使小车附着在平面上，它是不变的，因而在决定质量上是完全不起作用的。这种决定质量的方法和放在天平上称的方法是完全不同的。如果地球不吸引物体，即如果不存在重力的话，我们无论什么时候都不能使用天平。这两种决定质量的方法的差异在于：第一种方法与重力没有任何关系，而第二种则全靠重力的存在。

我们问：如果我们用上面所说的两种方法决定两个质量之比，那么我们所得到的结果是一样的吗？实验给我们的答案很清楚，结果恰恰是一样的。这个结论是不能够被预知的，因为它是根据观察而不是根据推理得出来的。为简便起见，我们把用第一种方法所决定的质量叫作**惯性质量**，而把用第二种方法所决定的质量叫作**引力质量**。在我们的世界中，它们恰巧相等，但是我们很容易想象它们并不是永远或到处相等的。这样就立刻产生了另一个问题：这两种质量的相等是纯粹偶然的，还是有更深远的意义？根据经典物理学的观点，回答是这样的：这两种质量的相等是偶然的，再也没有更深远的意义可寻了。但是现代物理学的回答恰恰与之相反：这两种质量的相等是根本性的，并且它构成了新的、非常重要的线索，这个线索将我们引导到更深远的理解领域。事实上，这是由此产生所谓广义相对论的非常重要的线索之一。

如果一个侦探故事把奇案都描写成是偶然的，那么它绝不是一个好故事。按照合情合理的安排来发展故事的情节，我们一定会感到更满

意。对于理论的看法也完全一样，尽管两种理论都跟观察到的情况相符，如果其中一个理论能做出引力质量和惯性质量为什么相等的解释，而另一个理论却认为它们的相等是偶然的，那么前一个理论比后一个好些。

因为惯性质量和引力质量的相等是阐明相对论的基本原理，我们应当在这里把它更细致地考察一番。有什么实验令人信服地证明了两种质量是一样的呢？答案已隐藏在伽利略从塔上丢下不同质量的各种物体的古老实验里了。他发现各种质量的下落时间总是相同的，那就是一个落体的运动与质量无关。要把这个简单但又非常重要的实验结果跟这两种质量的相等联结起来，还需要一些更复杂的推理。

一个静止的物体受外力作用以后，就开始运动并达到一定的速度。它受外力作用而运动的难易程度和它的惯性质量有关。质量大时，便不容易动；质量小时，便容易动。若不求十分严格，我们可以说：一个物体受外力作用的“感召”，其应验的灵敏程度取决于它的惯性质量。假使地球确实以同样的力来吸引所有的物体，那么惯性质量最大的物体，在下降时就会比任何其他物体慢些。但是事实并不是这样，所有物体的下降情况都相同。这表示地球必定以不同的力吸引不同的质量。现在，地球只以重力来吸引石子，对于石子的惯性质量是什么一无所知。地球的“感召”力取决于引力质量。石子的“应验”运动取决于惯性质量。因为“应验”运动总是一样的，也就是说，从同样高程下降的一切物体都以相同的方式下降。由此可以推论：引力质量和惯性质量相等。

上面这个结论，由物理学家来表述，就更带有学究气味了：一个落体的加速度与其引力质量成正比而增加，而与其惯性质量成反比而减小。因为所有的落体都具有相同的不变的加速度，所以这两种质量必定是相等的。

在我们这个奥妙的侦探故事中，没有一个已经被完全解决的问题，也没有一个永远不变的问题。三百年之后，我们又回到最初的运动问题上来修改侦查的程序，寻求过去被忽视的线索，因而得到了我们周围宇

宙的另一个不同的图景。

热是一种物质吗

现在我们来着手了解一个新的线索，它是在热现象的范围内起源的。可是我们不能把科学分割成若干独立的、无关的部分。事实上，我们很快就会看到这里所介绍的新概念是和那些已熟知的概念以及我们将来还要遇到的概念交织在一起的。在科学的一个分支中发展起来的一种思想方法往往能够用来解释表面上完全不同的结果。在这个过程中，原来的概念往往须加以修改才能帮助我们既可理解这个概念得以产生的那些现象，也可理解目前正有待这个概念来解释的那些现象。

用来描述热现象的最基本的概念是**温度**和**热**。在科学史上，人们花了非常长的时间才把这两种概念区别开来，但是一经辨别清楚，科学就得到了飞速的发展。虽然现在每个人都熟悉了这两个概念，我们仍对其进行细致的考察，并且着重指出两者的区别。

我们的触觉会很清楚地告诉我们，一个物体是热的，而另一个物体是冷的。但是这纯粹是定性上的判断标准，还不足以做定量的描述，而且有时甚至会含糊不清。这已经从大家所熟知的一个实验中得到了证明：设有三个容器，一个装冷水，一个装温水，一个装热水。如果我们把一只手浸入冷水，而另一只手浸入热水，那么我们得到的感觉是，第一个容器里的水是冷的，而第二个容器里的水是热的。如果随后我们把两只手同时浸入温水里，那么两只手得到的两种感觉是相互矛盾的。同样的道理，如果北极国家的一个居民和赤道国家的一个居民于春季时在纽约会面了，他们对于气候是冷是热也持有不同的意见。我们用温度计来解决所有这些问题。最早期的温度计是伽利略（又是那个熟悉的名字！）设计的。温度计的使用是以某些明显的物理学假说为基础的。我

们可以引用大约在150年以前布勒克（Black）的讲义中的几行文字来温习一下这些假说。布勒克在对于扫除热和温度这两个概念混淆在一起的困难问题上有很大的贡献：

> 由于应用了这种仪器，我们发现，假如我们取一千种甚至更多不同种类的物质，例如金属、石子、盐、木头、羽毛、羊毛、水和各式各样的液体，把它们一起放在一个没有火、没有阳光照射进去的房间内。虽然它们原来的**热**各不相同，但在被放进这个房间以后，热会从较热的物体传到较冷的物体中。经过几个小时或一天以后，我们用一个温度计一一检查这些物体，温度计所标出的度数都是相等的。

引文中有一个黑体的“热”字。按照现代的术语，这个字应该用**温度**来代替。

一个医生从病人口中把温度计拿出来，他可以做这样的推理：“温度计用它的水银柱的长度指出它自己的温度。我们假定水银柱长度的增加与温度的增加成正比。但是温度计和我的病人接触了几分钟，所以病人和温度计具有相同的温度。因此我推断我的病人的温度就是温度计上所记录的那个温度。”医生也许只是在做无意识的工作，然而他没有想到他已经在运用物理学的原理了。

但是一个温度计所包含的热量是不是和一个人的身体所包含的热量一样呢？自然不是。假如因为两个物体的温度相等，便认为它们的热量也相等，像布勒克所指出的，这是

> 把问题看得太马虎了。这是把不同物体中热的量和热的一般强度或密集度混淆了。很明显，这是不同的两件事。在研究热的分布时，我们应当经常加以区别。

只要考察一个很简单的实验，我们就可以理解这种区别。把1磅水放在火焰上加热，要使它的温度从室温达到沸点需要一些时间。如果同一个容器装上12磅水并且用同样的火源加热，要使它达到沸点，那么，需要的时间就多得多了。我们把这个论据解释为现在需要更多的“某种东西”，而我们称这个“某种东西”为**热**。

从下面的实验中得出了一个更重要的概念——**比热**：一个容器中装1磅水，而另一个容器装1磅水银，将它们用同样的方式加热。水银热起来要比水快得多，这表明使水银的温度升高1华氏度[注]所需要的“热”较少。一般来说，把质量相等的不同种类的物质，例如水、水银、铁、铜、木等加热1华氏度，例如从40华氏度加热到41华氏度，它们所需的“热”的量是不同的。我们说：每一种物质都有它独自的**热容量**或**比热**。

一旦有了热的概念，我们就可以更细致地研究它的本性了。设有两个物体，一个是热的，另一个是冷的，或更确切地说，一个物体的温度比另一个高些。我们使它们进行接触，并使它们不受任何外界影响。我们知道，最后它们会达到同样的温度。但是，这个情况是怎样发生的呢？从它们开始接触起到它们达到同样温度的时间里，究竟发生了什么呢？我们可以在脑海中想象这么一个图景：热从一个物体流向另一个物体，正如水由较高的水位流向较低的水位一样。虽然这个图景似乎很原始，但它跟很多论据相符，因此可以提出这样的类比：

水——热

较高的水位——较高的温度

较低的水位——较低的温度

流动一直要继续到两个水位，也就是说两个温度相等时才停止。这个朴素的观点在定量的考察上更有用处。如果把各自有一定质量和一定

温度的水和酒精混合，那么知道了比热，就能预言混合物最后的温度。反之，只要观察到最后的温度，用一点儿代数知识就可以求出这两个比热的比率。

我们看到，这里所出现的热的概念，和其他的物理学概念有相似之处。根据我们的观点，热是一种物质，就像力学中的质量一样。它的量可以改变，也可以不改变；正如钱一样，可以被储存在保险柜里，也可以被花掉。只要保险柜始终锁着，柜里面钱的总数就始终保持不变；和这一样，一个被隔离的物体中的质量的总数和热的总数也是不变的。理想的保温瓶就和这样的保险柜类似。而且，在一个孤立系统中，热即使从一个物体流向另一个物体，整个系统的热量也是守恒的；这正和一个孤立系统即使发生了化学变化，质量也保持不变一样。热即使不是用来提高物体的温度而是用来溶化冰或把水变成水汽，我们仍然可以把它想象为物质，因为只要把水冻结为冰，或把水汽凝为水时，又可以重新得到它。溶化潜热或汽化潜热这一类旧名称都表明这些概念是由于把热想象为一种物质而产生的。潜热是暂时潜伏，正如把钱存放在保险柜里，如果有人知道开锁的办法，就可以把它拿出来用。

但是，热肯定不是一种与质量有相同意义的物质。质量是可以用天平来测定的，而热怎样呢？一块炽热的铁是不是比它在冰冷的时候重一些呢？实验证明并不如此。如果热是一种物质，那么它应该是一种没有重量的物质。“热物质”通常被称为**卡路里**，这是我们认识一整族没有重量的物质中最先认识的一种。以后我们还将有机会研究这一族的兴起和衰落的历史，目前只要注意这一种无重物质的诞生就够了。

任何一种物理学理论都要将现象的范围解释得愈广愈好。只要它使得各种现象能被理解，就证明它是正确的。我们已经知道，物质论解释了许多热现象，但是很快就会明白，这又是一个错误的线索。热不能被看作一种物质，即使被看作一种没有重量的物质也不行。我们只要回想一下标志着人类开化初期的几个简单的经验，便能明白这一点。

我们把物质看作一种既不能被创造也不能被毁灭的东西。但是，原

始人用摩擦的方法创造出足够的热，用来点燃木材。用摩擦生热的例子实在太多、太熟悉了，因而不必再一一列举。在所有这些例子中都创造出一些热量，这是一件很难用物质论来解释的事情。诚然，这个理论的拥护者还会想出一些论证来解释这件事情。他的推理可能是这样的：“物质论可以解释表观上的热的创生。举一个最简单的例子：拿两块木头来相互摩擦。摩擦影响了木头并改变了木头的性质。木头的性质很可能是这样被改变的，即热的量并不改变而能产生较前为高的温度。总之，我们见到的只是温度的升高。可能是摩擦改变了木头的比热，而不是改变了热的总量。”

在目前的讨论阶段来和一个物质论的拥护者辩论是无益的，因为这件事只能通过实验来解决。我们设想有两块各方面完全相同的木头，并且设想用不同的方法使这两块木头发生同样的温度改变：例如，一种是用摩擦的方法，而另一种是让它与放热器接触。如果两块木头在新的温度下有相同的比热，那么整个物质论就被推翻了。我们有好多测定比热的简单方法，而这个理论的命运正取决于这些测量的结果。在物理学史上，通常有一些实验能宣判一个理论的生死，这种实验被称为判决实验（crucial experiment）。评价一个实验所具有的判决意义只能从提出问题的方式上得到启示，而且只是讨论现象的一种理论才可以用这种实验来判断。同一种类的两个物体，一个用摩擦的方法，另一个用传热的方法，使它们达到相同的温度，然后测定它们在这个温度下的比热，这就是判决实验的一个典型例子。这个实验大约是在150年前由伦福德[注]完成的，它给热质说致命一击。

现在根据伦福德的笔记将经过情况引述如下：

> 人们的日常事务和工作往往会提供他们思索自然界的一些最奇妙的作用的机会，而且常常可以不必花多少精力和经费，只要利用工业生产上仅为完成生产任务而设计的机械就可以进行非常有意义的科学实验。

我常常有机会做这一类观察，并且我深信，只要养成一种习惯，时常去留心日常生活中所发生的一切事情，那么往往会引起有用的怀疑和研究与改进方面意义深远的计划。这些情况有的是突然发生的，有的是在思索极普通的现象时所进行的飘逸的遐想中发生的。这样所引起的怀疑和研究改进的机会，比那些整天坐在书房里专门从事科学研究的哲学家全神苦思时所能引起的还会多些。

最近我应邀去慕尼黑兵工厂领导钻制大炮的工作。我发现，铜炮在钻了很短一段时间以后，就会产生大量的热；而被钻头从炮上钻出来的铜屑更热（正如我用实验所证实的，它们比沸水还要热）。

在上述的机械动作中实际产生的热是从哪里来的呢？

它是由钻头在坚实的金属块中钻出来的金属屑供给的吗？

如果真是这样，那么根据潜热和热物质的现代学说，它们的热容量不仅要变，而且要变得足够大，才能解释所产生的全部的“热”。

但是，这样的变化不会发生，因为我发现：使这种金属屑和用细齿锯从同一块金属上锯下来的金属薄片的重量相同，并把它们在相同的温度（沸水的温度）下各自放进盛有冷水的容器里，冷水的重量和温度也都相同（例如在59.5华氏度）；放金属屑的水看起来并不比放金属片的水热些或冷些。

最后，我们来读伦福德的结论：

在推敲这个问题的时候，我们一定不能忘记考虑那个最显著的情况，就是在这些实验中由摩擦所生的热的来源似乎是**无穷无尽**的。

自不待说，任何**与外界隔绝**的一个物体或一系列物体能**无限地**连续供给的任何东西绝不能是**具体的物质**；并且，如果不是十分不

可能的话，凡是能够和这些实验中的热一样被激发和传播的东西，除了把它认为是“运动”以外，我似乎很难形成把它看作其他东西的任何明确的观念。

这样一来，我们看到旧的理论是崩溃了，或者说得更严格些，我们认识到物质论不适用于热流的问题。因此像伦福德所指出的那样，我们得重新寻找新的线索。要做到这点，让我们暂且抛开热的问题，再回到力学上来。

升降滑道

我们来研究一下游乐场中升降滑道上的运动（图18）。把一辆小车吊上或开到轨道的最高点。当一下子把它放松，它就开始在重力的作用下朝下滚去，随后沿着一条形状古怪的曲线上升或下降。因为速度突然改变，乘客会产生惊心动魄的快感。每个轨道有一个最高点作为起点。在小车运动的整个过程中，它绝不能再达到起点的高度。对运动做一番全面的描述是非常复杂的。从一方面来说，这是一个力学的问题，因为这里存在着速度和位置在时间上的变化；从另一方面来说，因为有摩擦，在轨道和车轮上会产生热。把这个物理过程分成这两个方面的主要理由是使得我们有可能应用以前所讨论过的概念。这样一分，便得到一个理想实验，因为一个只表现力学方面的物理过程是只能想象而不能实现的。

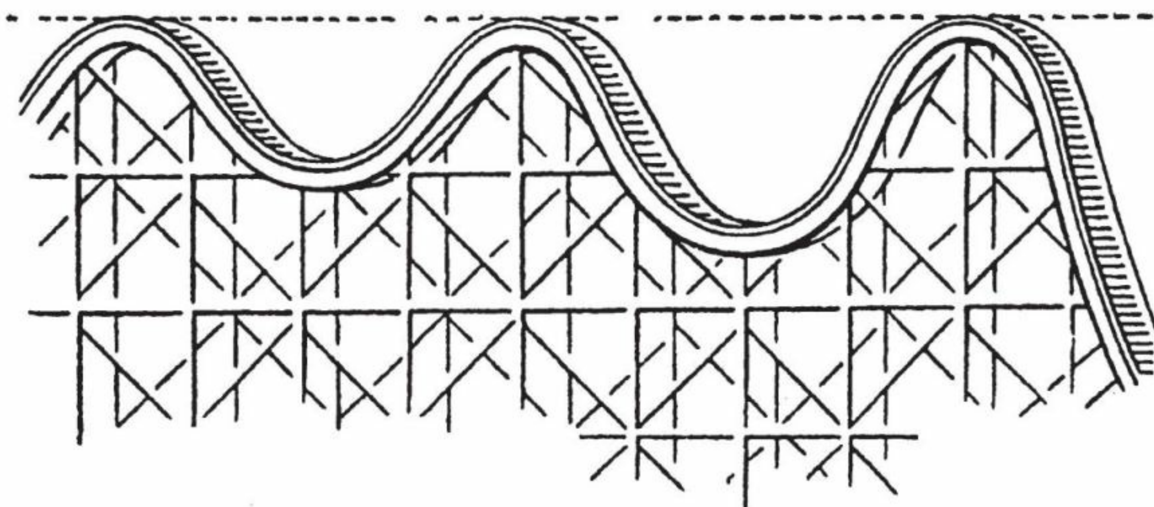


图18

对于这个理想实验，我们可以想象有人能够将伴随运动一起出现的摩擦全部消灭。他决定用这一新发明来建造一个升降滑道，并且在探究建造这个滑道的方法。小车从起点开始一上一下地运动，假定起点离地面100英尺。通过多次试验和改正错误，不久他知道他必须遵从一个简单的规则：他可以按照自己的意愿把轨道建成任何形式的线路，但是有一个条件，不能有一点比起点高。如果小车能够自始至终没有摩擦地运动，那么在整个行程中，他想让小车的高度达到100英尺多少次就多少次，但绝不能超过这个高度。在实际的轨道上，由于摩擦的关系，小车永远不能到达起点的高度，但是这里的假想工程师并不需要考虑这一点。

我们来研究理想小车从理想滑道的出发点开始向下滚的运动。当它运动的时候，它与地面的距离减小了，但它的速率却增加了。乍一看，这句话使我们想起小学语文课中的句子：“我没有一根铅笔，但你有六个橘子。”可是这句话并不那么笨拙可笑。我没有一根铅笔跟你有六个橘子之间并没有任何联系，但是小车离地面的距离跟它的速度之间却存在着很真实的关系。如果我们知道它当时离地面多高，就可以在任何时刻准确地计算它的速率；但是这个说法具有定量的性质，最好用数学公式来表示，因此我们在这里只好把它撇开不谈。

在滑道的最高点上，小车的速度为零，其与地面的距离为100英尺；在滑道的最低点上，小车与地面的距离可能是零，而速度最大。这些论据可以用另一些术语来表达：在最高点上，小车具有**势能**而没有**动能**；在最低点上，小车具有最大的动能而没有任何势能。在所有的中间位置上，既有速度又有高程，所以小车既有动能也有势能。势能随着高程的增大而增加，而动能则随着速度的增大而增加。力学的原理足以解释这种运动。在数学上有两种描述能的表式，其中每一种能都可以改变，而它们的和保持不变。这样我们就可能用数学方法严格地介绍与位置有关的势能的概念和与速度有关的动能的概念。自然这两个名称的引用是随意的，并且只是为了方便而已。这两个量的和保持不变，被称为运动恒量。动能和势能加起来的全部能，举例来说，可以跟总数不变的钱相比，它们不断地按照固定的兑换率由一种货币兑换成另一种，例如由英镑兑换成美元，再由美元兑换成英镑。

在实际的升降滑道中（图19），虽然摩擦力使小车不能重新达到像起点那样的高度，但是仍发生动能和势能之间的不断转换。这里它们的总和却不是不变，而是逐渐地减小了。现在必须再做出一个重要且大胆的步骤才能把运动的力学的和热的两个方面联系在一起。这一步骤所得出的结果和推广的意义在后面将会看到。

现在，除了动能和势能以外，又涉及另外一种东西，那就是摩擦所产生的热。这种热是否相当于机械能的减小，即动能和势能的减少呢？一个新的猜测已经摆在我们的眼前了。如果热可以被看作能的一种形式，那么也许这三种能，即热能、动能和势能的总和是保持不变的。不是单独的热，而是热和其他形式的能合起来才像物质一样是不可被消灭的。这就像有一个人把美元兑换成英镑时，本来要付一些法郎作为手续费，而这笔手续费省下来了，因此，根据固定的兑换率，美元、英镑和法郎的总数是一个不变的数值。

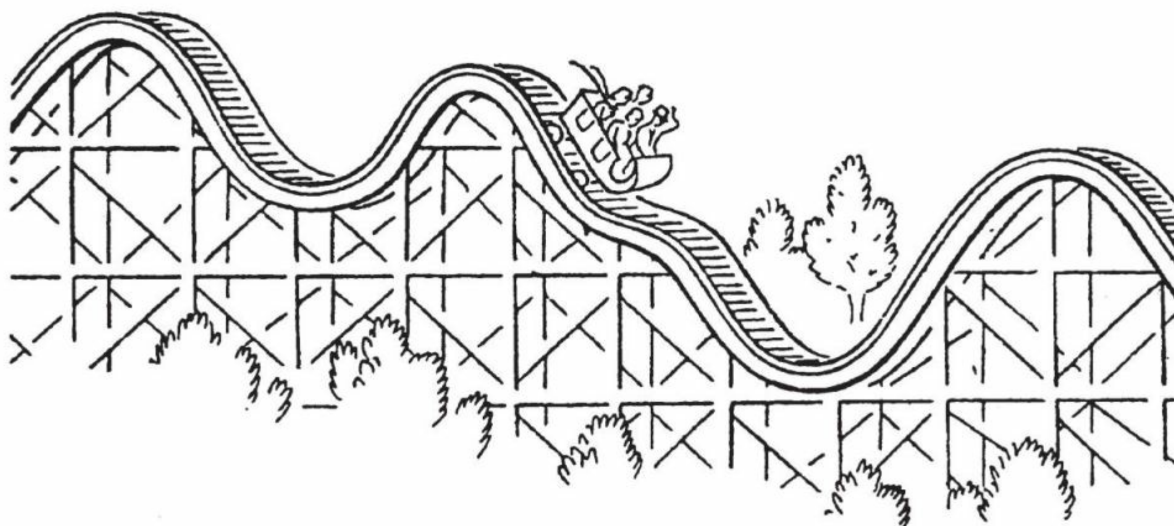


图19

科学的发展推翻了把热看作一种物质的旧概念。我们要创造一种新的物质，就是能，而把热看成能的形式之一。

转换率

不到100年以前，迈尔注猜测了一个新的线索，这个线索引出了把热看作能的一种形式的概念。焦耳后来用实验方法确认了这个概念。使人惊奇的是：几乎所有关于热的本性的基本工作都是非专职的物理学家做的，他们只不过把物理学看作自己最大的嗜好而已。这里有多才多艺的苏格兰人布勒克、德国的医生迈尔，以及美国的冒险家伦福德。还有英国的一个啤酒酿造师焦耳，他在工作之余做出了有关能量守恒的几个最重要的实验。

焦耳用实验证实了热是能的一种形式的猜测，并且确定了转换率。他的成果怎样，现在花一些时间来熟悉一下是很值得的。

一个系统的动能和势能合起来构成了它的机械能。在升降滑道的例

子中，我们猜测过有一部分机械能转变成了热。如果这是猜对了，那么在这里，并且在所有其他类似的物理过程中应该存在着两者之间的固定**转换率**。严格地说，这是一个定量的问题，但是一定数量的机械能可以转变成一定数量的热这一点是很重要的。我们很想知道到底用一个什么样的数来表示转换率，就是说，从一定数量的机械能可以得到多少热。

这个数的确定就是焦耳研究的目的。在他的实验中，有一个实验的机构很像有重锤的钟。挥动这只钟，两个重锤就升高，因此使这个系统增加了势能。如果不再干扰这只钟，便可把它当作被封闭的系统。重锤逐渐下降，钟的能减少了。在一定时间以后，重锤将会到达其最低位置，于是钟就停下来了。能发生了什么情况呢？重锤的势能转变为机构的动能，随即又逐渐以热的形式散失了。

焦耳把这种机构巧妙地加以改变以后，便能测量热的损耗，从而测定转换率。在他的仪器中，两个重锤使一个浸在水中的叶轮（图20）转动。重锤的势能转变为运动部件的动能，由动能转变为热，从而提高了水的温度。焦耳测量了温度的改变，并且借助于已知的水的比热算出它所吸收的热量。他把多次实验的结果总结如下：

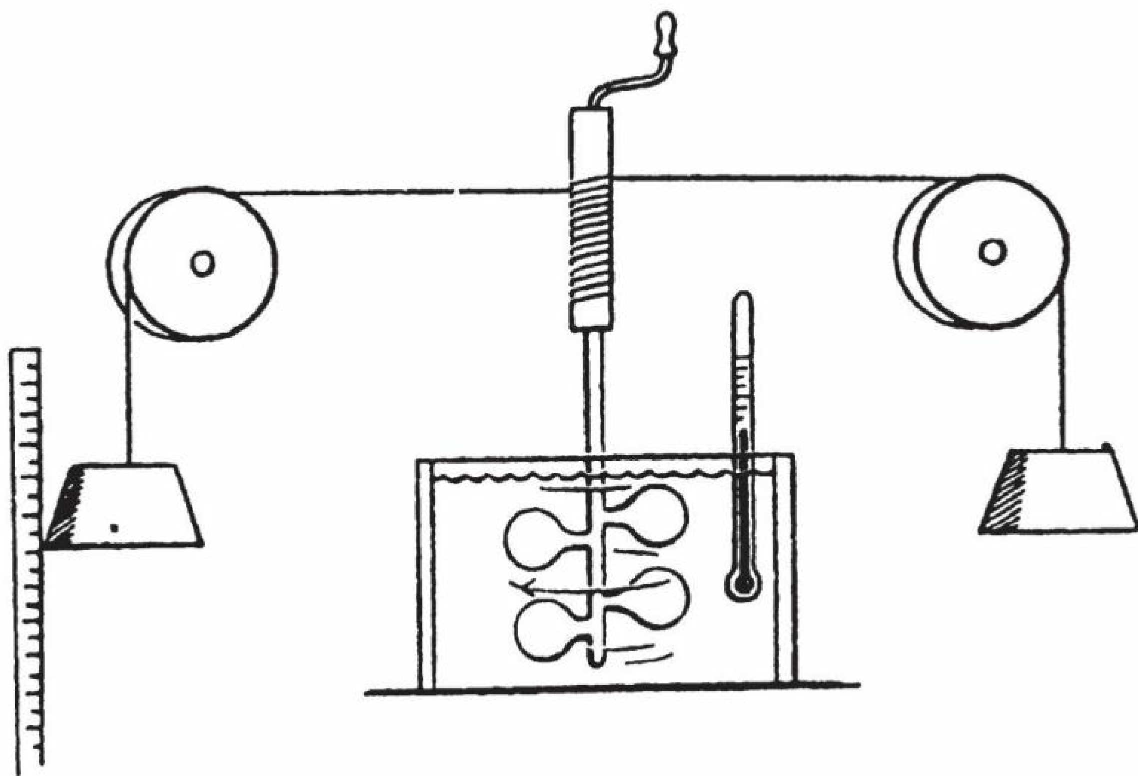


图20

1．物体（无论是固体还是液体）相互摩擦所产生的热量永远与其所消耗的力（焦耳所说的力是指能）成正比。

2．要产生可以把1磅水（在55华氏度和60华氏度之间的真空中称定的）的温度升高1华氏度的热量所需要的机械力［能］，可以用772磅重的物体在空中下降1英尺来表示。

换句话说，把772磅重的物体在地面上升高1英尺的势能，等于把1磅水从55华氏度升高到56华氏度所需要的热量。虽然后来的实验在一定程度上将这个实验的精确度提高了，但是热功当量主要是焦耳在他的先驱性工作中发现的。

这个重要的工作一旦完成，后来的进展就很快。人们不久就认识到机械能和热能只不过是能的很多种形式中的两种而已。任何东西，只要能转变为这两种中的一种，它就是能的一种形式。太阳所发出的辐射是

能，因为其中一部分在地球上转变为热。电流也具有能，因为它可以使导线发热并使电动机转动。煤代表着化学能，因为这种能在煤燃烧时就被释放出来了。在自然界的每一种现象中，一种形式的能总是以一个完全确定的转换率转变为另一种形式的能。在一个不受外界影响的封闭系统中，能量是守恒的，因此和物质很相似。在这样的系统中，虽然任何一种形式的能的量也许会变化，但所有各种形式的能的总和是不变的。假使我们把整个宇宙看作一个封闭系统，那么我们可以和19世纪的物理学家一起，骄傲地宣布宇宙的能是不变的，它的任何一部分都既不能被创造也不能被消灭。

我们对于物质的两个概念是**质**和**能**。两者都遵循守恒定律：一个隔离系统的质量和总能都是不变的。物质具有重量，而能没有重量。因此，我们有两个不同的概念和两个守恒定律。现在我们还能一直把这些观念认为是严格的吗？或者按照新的发展方向，这个表面上巩固可靠的图景是否已有所改变呢？变了！这两个概念在相对论中又有了改变。以后我们还会回到这个问题上来的。

哲学背景

科学研究的结果常常迫使人们对哲学问题的看法发生变化，而这种变化远远超出了科学本身的局限。科学的目的是什么呢？一个描述自然的理论应该是怎样的呢？这些问题虽然超越了物理学的界限，但却与物理学有很密切的关系，因为科学形成物理学得以产生的资料。哲学的推广必须以科学成果为基础。可是哲学一经建立并被人们广泛接受以后，又常常促使科学思想进一步发展，指示科学如何从许多可能的道路中选择一条路。等到这种已经被接受了的观点被推翻以后，又会有一种意想不到和全新的发展，它又成为一个新的哲学观点的源泉。除非我们从物

理学史中举例说明，否则这些话听起来一定是很含糊和空泛的。

现在我们来描写以阐明科学为目的的最初的哲学观点。这些观点在很大程度上推动了物理学的发展，一直到近100年以前，才被新的验证、论据和理论推翻，而这些新的验证、论据和理论又构成了新的科学背景。

从希腊哲学到现代物理学的整个科学史中，不断有人力图把表面上极为复杂的自然现象归结为几个简单的基本观念和关系。这就是整个自然哲学的基本原理。它甚至表现在原子论者的著作中。在2300年前，德谟克利特（Democritus）写道：

> 依照惯常的说法，甜总是甜，苦总是苦，冷总是冷，热总是热，颜色总是颜色。但是实际上，只有原子和空位。就是说，我们惯于把感觉的事物当作实在的，但是真正说起来，它们不是实在的。只有原子和空位是实在的。

在古代哲学中，这个观念不过是巧妙的想象而已。有关后来出现的许多事件的自然法则，希腊人是不知道的。把理论和实验联系起来的科学，事实上是从伽利略的工作开始的，我们已经研究过形成运动定律的最初线索。在200年的科学研究中，力和物质是理解自然的一切努力中的基本概念。我们不能想象这两个概念可以缺少一个，因为物质总是作为力的源泉而作用于其他物质，并由此确证它的存在。

我们来研究一个最简单的例子：两个粒子，它们之间有力作用着。最容易想象的是引力和斥力。在这两种情况中，力的矢量都在物质粒子的连线上（图21）。为简单起见，我们只想象粒子相互吸引或排斥，因为任何其他关于作用力的方向的假定都会导致复杂得多的图景。我们对力的矢量的长度也能做一个同样简单的假定吗？即使我们想避免过分专门的假定，但这样做一个假定还是可以的：作用于任何两个已知粒子之间的力，像万有引力一样，只与它们之间的距离有关。这个假定似乎很

简单。我们有很多更复杂的力可以想象，例如不仅与距离有关，而且与它们的速度有关的那些力。若以物质与力作为基本概念，我们就未必能够得到比沿着粒子的连线作用并只与距离有关的力更简单的假定了。但是，只用这样一种力是否有可能描述所有的物理现象呢？

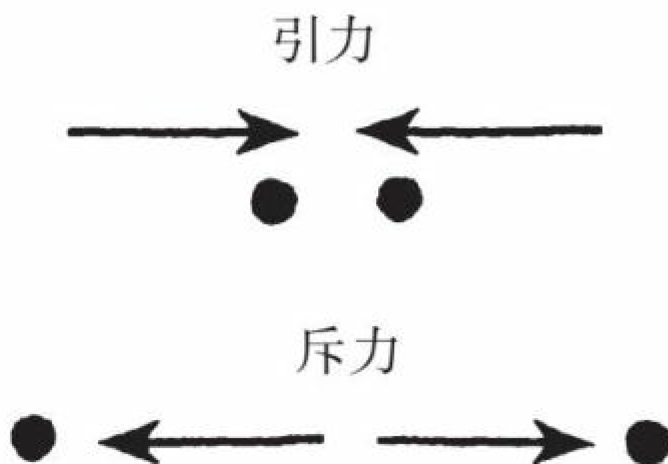


图21

力学在其各个分支中所取得的伟大成就、在天文学发展上的惊人成功、力学观念在那些显然不具有力学性质的问题上的应用，所有这些都使我们确信，用不变的物体之间的简单作用力来解释所有的自然现象是可能的。在伽利略时代以后的200年间，这样一种企图有意识地或无意识地表现在几乎所有的科学著作中。亥姆霍兹（Helmholtz）约在19世纪中叶把它表达得特别清楚：

> 因此，物理科学的任务，在我们看来，归根结底在于把物理现象都归结为不变的引力或斥力，而这些力的强度只与距离有关。要完全了解自然，就得解决这个问题。

因此，在亥姆霍兹看来，科学发展的方向是早已被决定了的，并且应该严格地遵循这样一条呆板的途径：

> 一旦把一切自然现象都化成简单的力，而且证明自然现象只能这样来加以简化，那么科学的任务便算终结了。

对20世纪的物理学家来说，这种观点是枯燥而幼稚的。假如他想到巨大的研究工作竟会这样迅速地结束，从而便确立了永远正确的宇宙图景，他一定会大吃一惊，从此不会有什么令他兴奋的事了。

即使这些见解能够把一切现象都用简单的力来描述，但还有一个问题没有解决，那就是力与距离之间的关系如何的问题。对不同的现象来说，这种关系可能是不同的。为了解释不同的现象而引入许多种不同形式的力，这种必要性从哲学的观点来看自然是很不圆满的。可是亥姆霍兹陈述得最清楚的这种所谓的**机械观**，在当时却起了很重要的作用。物质动力论的发展是最伟大的科学成就之一，而它就是直接受到机械观的影响的。

在叙述它的衰落以前，我们暂且接受19世纪的物理学家所持有的观点，并且看一看从他们这种关于外在世界的图景中可以得出什么样的结论。

物质动力论

是不是可以用有简单的力相互作用着的粒子的运动来解释热现象呢？在一个闭合的容器里装着一定质量和一定温度的气体（例如空气）。把空气加热，我们就提高了它的温度，因而也增加了它的能量。但是，这种热与运动的关系是怎样的呢？根据前面我们已经贸然接受过的哲学观点以及热是由运动产生的这个说法，我们可以认为热和运动是有关系的。如果每一个问题都是力学问题，那么热必须是机械能。**动力论**的任务就在于用这种方法来表达物质的概念。根据这种理论，气体便

是无数个粒子或**分子**的集合体，分子朝着各个方向运动，相互碰撞，并且在每次碰撞之后改变自己的运动方向。在这样的气体中的分子必定有一个平均速度，正如在人类社会中有平均年龄和平均收入一样。因此，也必定有粒子的平均动能。容器中的热越多，平均动能就越大。因此根据这个想象，热不是与机械能不同的一种特殊形式的能，它就是分子运动的动能。对于任何确定的温度，每个分子都有一个确定的平均动能。事实上，这不是一个随便的假定。假使我们要做出物质的一致的力学图景，就得把一个分子的动能看作气体温度的量度。

这个理论不单是一个想象而已。我们可以证明气体动力论不但与实验相符，并且实际上使我们对许多情况有一个更深刻的理解。这可以用几个例子来说明。

假设我们有一个容器，用一个能够自由移动的活塞将它封闭住（图22）。容器中装有一定数量的气体，这些气体的温度保持不变。如果起初活塞静止在某个位置，那么它可能因减重而上升，或者因加重而下降。要把活塞往下推，必须施加外力以抵抗气体的内压力。根据动力论，这种内压力的机构是怎样的呢？构成气体的数量极大的粒子是向各个方向运动的。它们撞击容器的壁与活塞，撞了又跳回来，正如掷到墙上的球一样。大量粒子的这种不断的撞击，反抗着作用在活塞与重物上的向下作用的重力，因而能使活塞保持在某个高度上。在一个方向上有不变的重力在作用，在另一个方向上则是分子的大量不规则的碰撞。假使两方面保持平衡，那么所有这些小的不规则的力对活塞的有效作用必须与重力相等。

假使把活塞推下去，它把气体压缩到只有原有体积的一部分，譬如说压缩到二分之一，它的温度却保持不变。那么根据动力论，我们可以预料有什么情况会发生呢？难道撞击力会比过去更有效些或更无效些吗？现在，粒子比过去更紧密了。虽然平均动能还像以前一样，但是粒子撞击活塞的次数更多了，因此总的力可能要大些。根据动力论所表达的图景可以清楚地看出，要使活塞保持在更低的位置，需要更大的重

量。这个简单的实验情况是众所周知的，但是它的预言却是从物质动力论合理地推出来的。

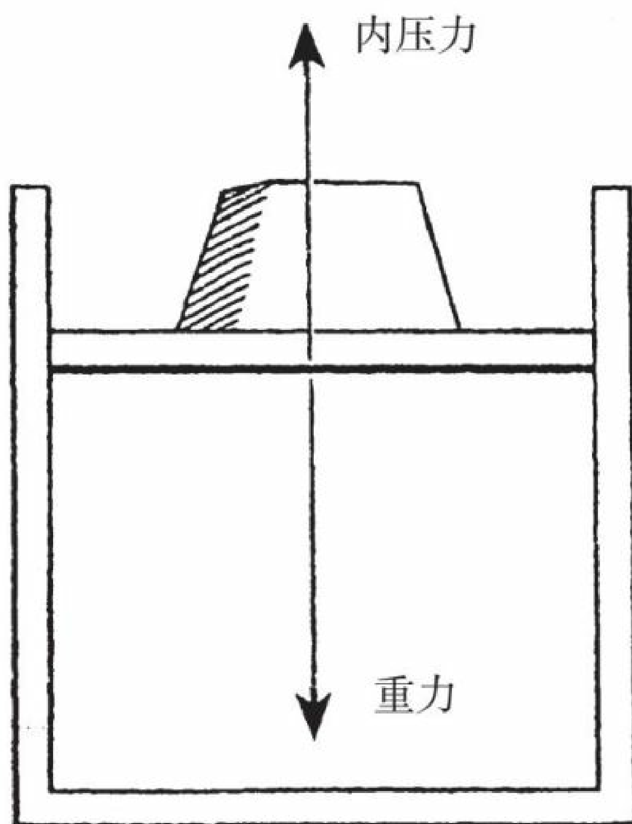


图22

再研究另一个实验。取两个容器，它们装有体积相等的不同气体，例如氢与氮，两者的温度相同。假设两个容器都用同样的活塞封闭住，加在活塞上的重量也相等。简单说来，这就表示两种气体具有相同的体积、温度与压力。因为温度相同，那么根据动力论，粒子的平均动能也相同。因为压力相同，那么两个活塞都受到同样的总的力的撞击。平均起来，每个粒子具有相同的能量，两个容器具有相同的容积。因此虽然在化学上来说这两种气体是不同的，但是**每个容器中的分子数必定是相等的**。这个结果对理解许多化学现象是很重要的。它表明在一定的温度和压力下，在既定的容积中的分子数不是某一种气体所独有的，而是一切气体都有的。特别是动力论不仅预言这样一个普遍的数的存在，而且

还能帮助我们来决定这个数。我们以后还要再研究这个问题。

物质动力论不但能定性地而且能定量地解释由实验确定的气体定律。而且，虽然这个理论的最大成就是在气体方面，但它不限于气体。

气体可以用降低温度的方法使其液化。降低物质的温度就意味着减小它的粒子的平均动能。因此，很明显，液体内粒子的平均动能比相应的气体的粒子的平均动能小。

所谓**布朗运动**首先给液体内粒子的运动做了一个令人信服的说明。这个奇异的现象，如果没有物质动力论，会是完全神秘和不可理解的。它是植物学家布朗（Brown）首先观察到的，而80年之后，在20世纪初，它才得到解释。只要有一架质量不必特别好的显微镜，就可以观察布朗运动。

布朗当时正研究某些植物的花粉粒子，照他的话说，那是：

花粉粒子或其他粒子的最大尺寸，其长度从1/4000英寸至1/5000英寸不等。

接着，他又说：

当我观察这些浸在水中的粒子对，我发现很多都在不停地运动着……经过多次重复的观察以后，我确信这些运动既不是由于液体的流动也不是由于液体的逐渐蒸发引起的，而是属于粒子本身的运动。

布朗所观察到的是悬浮在水中而且用显微镜可以观察到的粒子的不停的扰动。这是一个很动人的景色！

观察到的这种现象是否与选择哪一种特殊的植物有关系呢？为了回答这个问题，布朗用许多种不同的植物来重复做这个实验。他发现，所

有这样的花粉粒子，只要足够小，只要悬浮在水中，都会表现这样的运动。他进一步发现，无论是无机物还是有机物的微粒，都有同样不停的无次序的运动。他甚至用石头研细的粉末来试验，也观察到了这种运动！（参看书末的附图Ⅰ）

怎样解释这种运动呢？这种运动似乎和过去的全部经验都矛盾。譬如说，每隔30秒钟对悬浮着的一个粒子的位置进行一次观察，就会看出它的路径的奇怪形状。可令人惊异的是，这种运动看来是永无止境的。把一个摆动着的钟摆放在水中，如果不加外力推动，它很快就会静止。一种永不减弱的运动的存在，似乎跟所有以前的经验都是矛盾的。这个困难，都由物质动力论圆满地解释了。

甚至用现代最强力的显微镜来观察水，我们也不能像物质动力论所描述的那样看得到水分子和它的运动情况。因此，我们可以断定，假如把水看作粒子的集合体的理论是正确的，那么这些粒子的大小必定超出了最好的显微镜的可见限度。我们且不要攻击这个理论，并且假定它是一个描写实在的合理图景。用显微镜可以看到的布朗粒子是受到更小的水的粒子撞击。假如被撞的粒子足够小的话，便会发生布朗运动。它之所以会发生，是由于碰撞的不规则性和偶然性，因而从各方面来的这种撞击是不相等的，因而也不可能将它平均。这样，能够观察到的运动倒是观察不到的运动的结果了。大粒子的行为在某种程度上反映了分子的行为，可以说，它是把分子的行为放大到使得其能够在显微镜中看得见的程度。布朗粒子的运动路径的不规则性反映了构成物质的较小粒子的路径的同样的不规则性。从上述情况中，我们可以得到这样的结论：如果对布朗运动做一个定量的研究，能够使我们对物质动力论有一个更深刻的理解。很明显，可见的布朗运动与不可见的撞击分子的大小有关。如果撞击分子没有一定数量的能，或者换句话说，没有质量与速度，就不会有布朗运动。因此，布朗运动的研究能使我们决定分子的质量，这是不足为奇的。

经过理论方面与实验方面的艰苦研究，动力论定量的特色也已经形

成了。由布朗运动现象所产生的线索，便是形成定量数据的来源之一。从完全不同的线索出发，用不同的方法也可以得到同样的数据。所有这些方法都支持同一个观点，这个论据是很重要的，因为它说明了物质动力论的本质上的一致性。

在由实验和理论所得到的许多定量的结果中，这里只引用其中的一个。假使我们有1克最轻的元素氢，我们问：在这1克氢中有多少个粒子呢？这个问题的答案不仅回答了氢的问题，而且回答了所有其他气体的问题，因为我们已经知道，在什么条件下，两种气体会有同样数目的粒子。

根据对悬浮在水中的粒子的布朗运动的某些测量结果，理论使我们能够回答这个问题。答案是一个惊人的大数字：3后面接23个数字。1克氢中的分子数是：

303 000 000 000 000 000 000 000

设想1克氢的分子增大到可以用显微镜看得见，譬如说，它的直径达到了0.005英尺，就是说和布朗粒子的直径一样大。要把它们用一个箱子紧密地装起来，那么，这个箱子的每边大约是0.25英里长！

我们只要用1除以上面所指出的数字，便可以很容易地计算出一个氢分子的质量，答案是一个小得出奇的数：

0.000 000 000 000 000 000 000 003 3克

这个数代表一个氢分子的质量。

布朗运动的实验，只不过是决定这个数的许多独立的实验中的一个，而这个数在物理学上有很重要的作用。

在物质动力论和它所有的成就中，我们看到，把一切现象的解释都归结为物质粒子间力的相互作用这个普遍的哲学预示已经实现了。

结语

在力学中，假如知道一个运动物体现在的运动状态和作用在它上面的力，那么它未来的路径是可以被预言的，而它的过去也是可以被揭发的。例如所有行星的未来路径都是可以被预知的，作用在它们之上的是只跟距离有关的牛顿万有引力。经典力学的伟大成果暗示着机械观可以被无例外地应用于物理学的任何分支，所有现象都可以用引力或斥力来解释，而这些力只与距离有关，并且作用于不变的粒子之间。

在物质动力论中，我们看到这个从力学问题中兴起的观点怎样把热现象也包括进去，又怎样形成了一个很成功的物质结构的图景。

---

1. 柯南道尔（Conan Doyle），福尔摩斯侦探小说的作者。——译者注
2. 1英里≈1.6千米。——编者注
3. 1英尺≈0.3米。——编者注
4. 1英寸=2.54厘米。——编者注
5. 1磅≈454克。——编者注
6. 1盎司≈28克。——编者注
7. 1华氏度≈ -17摄氏度。——编者注
8. 本杰明·汤普森爵士，伦福德伯爵（Sir Benjamin Thompson, Count Rumford，1753——1814）是出生于英属美洲的英国物理学家、极多产的发明家。他挑战了当时占主流的热质说，对19世纪热力学的发展有重大意义。——编者注
9. 尤利乌斯·罗伯特·冯·迈尔（Julius Robert Mayer，1814——1878），德国医生、物理学家，热力学的先驱，能量守恒的发现者之一。——编者注

2

机械观的衰落

两种电流体

下面是关于几种简单实验的一个枯燥无味的报告。报告之所以令人厌烦，不单是因为描写一个实验总不如做实验那样有趣，同时还因为在未被理论阐明之前，它的意义是不明显的。我们的目的在于举一个突出的例子，以表明理论在物理学中的作用。

1．把一根金属棒放在一块玻璃底板上，棒的两端用金属线连接在验电器上。验电器是什么东西呢？这是一个很简单的仪器，主要是由悬挂在一根短短的金属棒头上的两片金箔组成的。把金箔装在玻璃瓶内，并且使金属棒只跟非金属，即所谓的绝缘体接触。除了验电器和金属棒之外，我们还要有一根硬橡皮棒和一块法兰绒。

实验进行如下：先看一下两片金箔是否合在一起，因为这是它们的

正常位置。如果它们没有合拢，那么用手指接触一下金属棒，让它们合起来。做了这些初步步骤以后，用法兰绒用力摩擦橡皮棒，再使它接触金属棒，两片金箔就立刻分开，甚至在橡皮棒移开以后，它们还是分开的（图23）。

2．我们再做另外一个实验，它所用的器具和以前的一样，开始实验时金箔仍然要合在一起。这次我们不使橡皮棒接触金属棒，而只放在金属棒附近。验电器的金箔又重新分开。但是，这次的分开有点不同了。当橡皮棒（它完全没有接触金属）移开后，金箔不继续分开，而是立即合拢，恢复到原来的位置。

3．我们把器具稍微改变一下，来做第三个实验。假定金属棒是由两节连接起来的。我们用法兰绒把橡皮棒摩擦过以后，再把它接近金属棒。同样的现象又产生了——金箔分开了。但是现在先把金属棒的两节分开，然后才把橡皮棒移开。我们发现，在这个情况中，金箔仍旧分开，而不像在第二个实验中那样恢复到原来的位置（图24）。

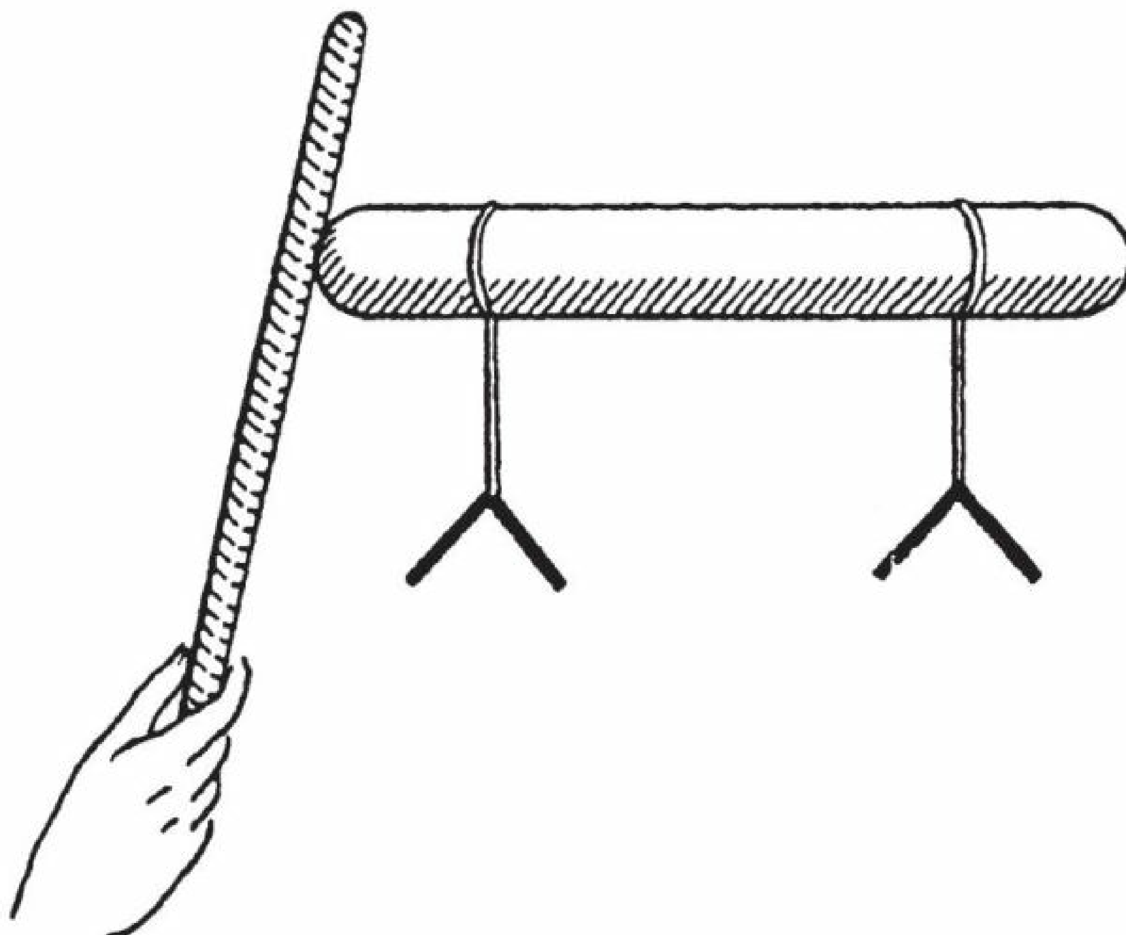


图23

在这些最简单的实验中很难引起热烈的兴趣。在中世纪，做这些实验的人也许已经受过非难了；而对我们来说，这些实验看来是枯燥的和不合理的。把上面的实验报告读了一次以后，再要重述一遍而不纠缠不清，恐怕都不是容易的事。有了一些理论观念，就可以帮助我们了解它们的意义。我们甚至可以进一步说，这样的实验绝不会是偶然进行的，人们一定已经预先多多少少知道了它们的意义。

现在我们把一个非常简单和朴素的理论的基本观念说出来，这个理论能说明上面的各种事实。

有两种电流体，一种叫作正的（+），而另一种叫作负的（-）。它们在过去表述过的意义上跟物质是很相似的，因为它们的数量既可以增

加，也可以减少，而在任一封闭系统里，其总量是守恒的。但是电的情况跟热、物质或能之间有一个重要的差别。电的物质有两种。除非做出某些概括，这里不能应用以前所做的钱的比喻了。如果物体的正的电流体和负的电流体完全相互抵消，这个物体就是电中性的。一个人若一无所有，可能是因为他确实一无所有，也可能是因为他放在保险柜里的钱的总数恰恰等于他负债的总数。我们可以把正负电流体比作账簿中的借项和贷项。

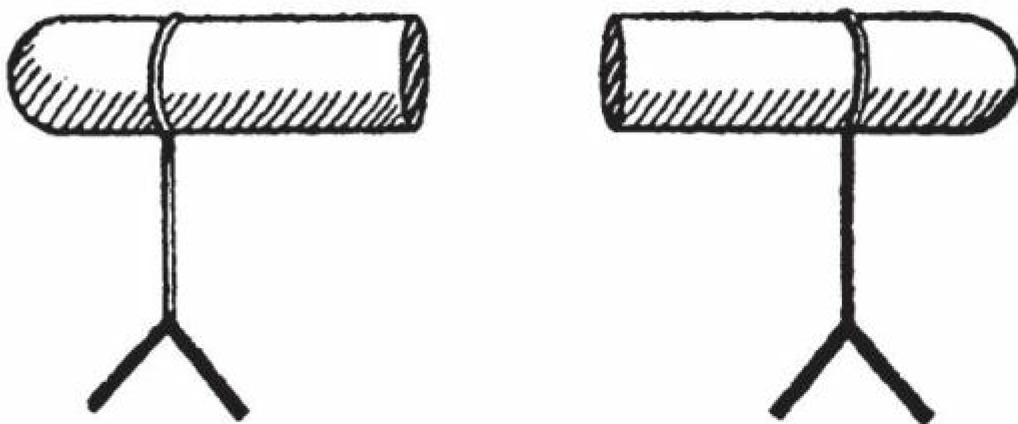


图24

这个理论的第二个假定是，同类的两种电流体互相排斥，而异类的两种电流体互相吸引。这可以用图来表达，如图25所示。

最后还必须有一个理论上的假定：物体有两类，电流体可以在物体中自由运动的一类叫作**导体**，电流体不能在物体中自由运动的一类叫作**绝缘体**。物体的这种分类不能认为是很严格的。理想导体和理想绝缘体都是永远不能实现的一种假象。金属、地面、人体都是导体的例子，但是它们的传导程度并不相同。玻璃、橡皮、瓷器之类都是绝缘体。空气只有局部的绝缘作用，这是看见过上述实验的人都知道的。静电实验的结果不好，通常都归因于空气的湿度，因为空气的湿度大了，会增加它的导电性。

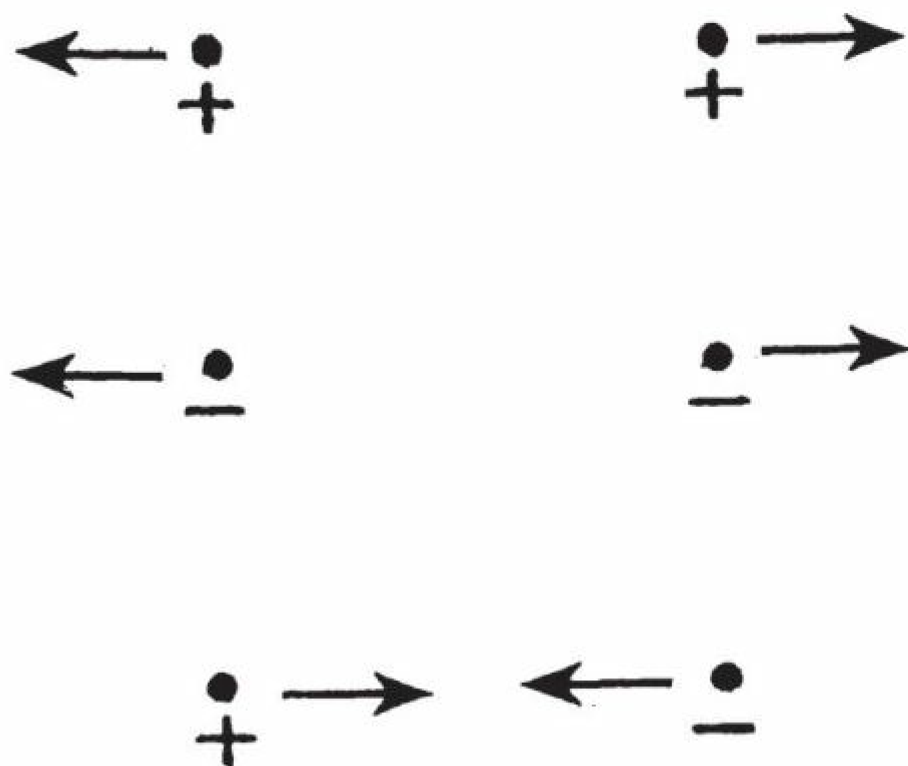


图25

这些理论性假定已经足以解释上面的三个实验了。现在我们按原来的次序把这三个实验用电流体理论再来讨论一番。

1．橡皮棒和其他物体一样，在正常情况下是电中性的。它包含正、负两种电流体，数量相等。用法兰绒摩擦它，就把两种电流体分开了。这完全是一种习惯上的说法，因为这种说法是应用理论所创造的术语来描述摩擦过程的。橡皮棒被擦以后，有一种多余的电叫作负电，这个名词当然只不过是相沿成习而已。假如实验是用毛皮摩擦玻璃棒，我们必须把这种多余的电叫作正电，因为只有这样才不至于跟前面的说法矛盾。我们继续做实验。让橡皮棒接触金属导体，于是我们就把电流体传送过去了。这些电流体在导体内自由地运动，于是它们就分布在包括金箔在内的整个导体上了。因为负电与负电相互排斥，所以两片金箔尽量地相互离开，其结果就是我们以前观察到的金箔的分开。金属要放在玻璃或其他绝缘体上，这样，只要空气的导电率很微弱，就可使电流体

一直留在导体上。现在我们懂得在实验开始以前必须用手指去接触金属棒的道理了。在这种情况下，金属、人体和地面构成了一个大的导体，因此电流体便分散得极为稀淡，验电器上实际上已经没有什么电流体了。

2．第二个实验在开始时是和第一个实验完全一样的。但是这次橡皮棒不接触金属棒，而只是挨近它。导体上的两种电流体因为都可以自由流动，所以被分开了；一种被吸引，而另一种被排斥。如果把橡皮棒移开，它们又重新混合起来，因为不同类的两种电流体是互相吸引的。

3．现在把金属棒先分为两节，然后把橡皮棒移开。在这种情况下，两种流体不能混在一起了，因此金箔保留了多余的那一种电流体，所以继续张开。

按照这个简单的理论，上述的所有情况似乎都是能够理解的。这个理论的作用还不止于此，它不仅使我们能够理解这些情况，而且还可以使我们理解“静电学”范围内的其他许多情况。任何一个理论的目的都是指导我们理解新的情况，启发我们做新的实验，从而发现新的现象和定律。举一个例子就明白了。设想把第二个实验加以改变。假使当我把橡皮棒放在金属棒旁边，同时又用自己的手指接触金属棒。现在会发生什么呢？理论能给出答案：受橡皮棒排斥的负（-）的电流体现在通过我的身体逃走了，结果在金属棒上留下的只有一种正（+）的电流体（图26）。只有挨近橡皮棒的一个验电器的金箔仍旧分开，做一做真实的实验就能确认这个预言。

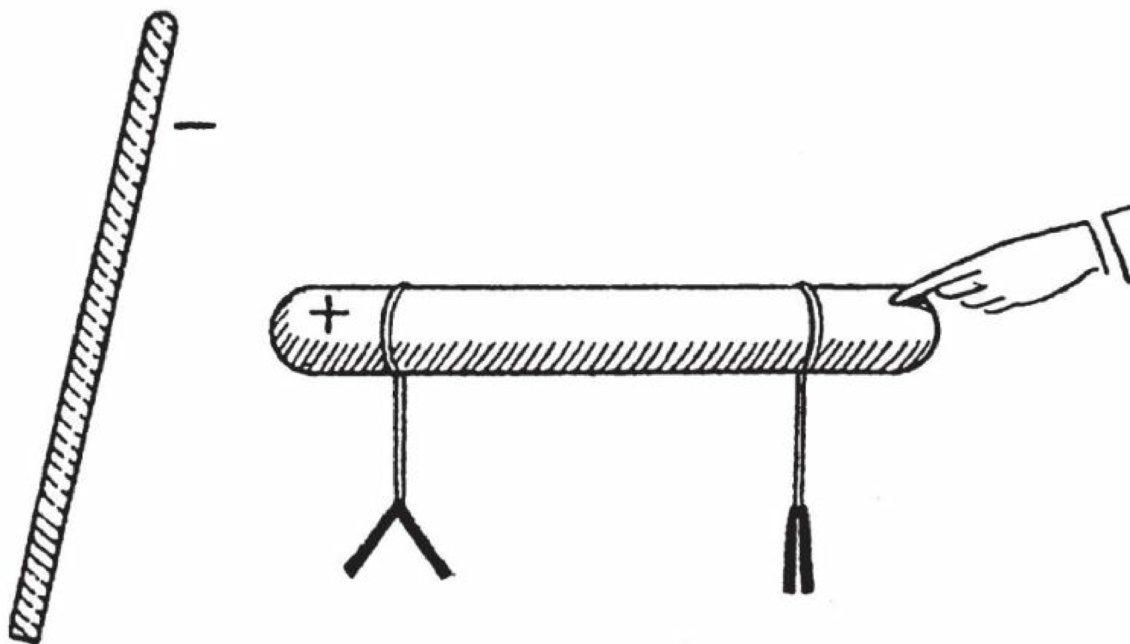


图26

这个理论自然很简陋，而且并不符合现代物理学的观点。可是它却是说明任何一种物理学理论的特色的一个很好的例子。

科学没有永恒的理论。一个理论所预言的论据常常被实验推翻。任何一个理论都有逐渐发展和成功的时期，经过这个时期以后，它就会很快地衰落。上面讲过的热的物质说的盛衰便是许多例子中的一个。还有其他更深刻、更重要的例子，以后还会讨论。几乎每一个科学上的重大进步都是由于旧理论遇到了危机，通过尽力寻找解决困难的方法而产生的。我们必须检查旧的观念和旧的理论，虽然它们是过时的，然而只有先检查它们，才能了解新观念和新理论的重要性，也才能了解新观念和新理论的正确程度。

在本书的开始，我们曾把科学家比作首先搜集必要的情况，然后用纯粹的思维去寻找正确答案的侦探。至少在一个论点上，这个比喻是很不恰当的。无论在现实生活中或在侦探小说里面，必定先知道有人犯罪，然后侦探才去检查信件、指纹、子弹、枪支等，他至少是知道发生了一起谋杀案。科学家就不是这样。我们很容易想象有些人对于电毫无

所知，因为所有的古人对于它都没有一点知识，但也生活得很快乐。假使你把金属棒、金箔、瓶子、硬橡皮棒、法兰绒，总之是要做那三个实验所必需的东西都交给这样一个人：他也许是一个很有文化的人，但他可能会用瓶子盛酒，拿法兰绒做抹布，而从不会想到拿它们去做我们上面所描述的实验。对侦探来说，犯罪是已知的，而问题就是：究竟谁杀了人呢？科学家却多少要自己犯罪，还要自己来侦查。此外，他不但要解释一个案子，而且要解释所有跟它有关的已经发生或可能发生的现象。

在引用电流体的概念时，我们知道这里受到了机械观的影响，因为机械观是用物质和作用于物质之间的简单的力来解释一切事物。要知道机械观能否用来描述电的现象，我们必须考察下面的一个问题。有两个圆球，都有电荷，就是说都带有某种多余的电流体。我们知道这两个圆球或者会互相吸引，或者会互相排斥。但是，力只与距离有关吗？如果就是这样，又怎样呢？最简单的猜测是这种力与距离的关系正如万有引力与距离的关系一样，例如距离增加三倍，它的强度便减为原来的九分之一。库仑所做的实验证明这个定律是确实可靠的。在牛顿发现万有引力定律之后100年，库仑发现电的力与距离之间的关系和万有引力与距离之间的关系一样。但是，牛顿定律与库仑定律之间有两个巨大的区别：万有引力是永远存在的，而电的力只是在物体带电时才有；万有引力只是吸引，而电力则既可以是吸引也可以是排斥。

现在产生了同样一个问题，这个问题在前面谈热的现象时已考察过。电流体是有重量还是没有重量的物质呢？换句话说，一块金属在电中性时和带有电荷时重量是否一样呢？我们把它称一下，发现这两个重量完全没有差别。由此我们可以断定，电流体也是没有重量的一族物质中的一种。

电的理论的进一步发展需要引入两个新的概念。我们还是避免严格的定义，改用已经熟悉的概念做比拟。我们记得要了解热的现象，区别热和温度是极为重要的。同样，这里区别电势和电荷也是很重要的。这

两个新的概念的区别用比拟的方法便可以弄明白：

电势——温度

电荷——热

两个导体，例如两个大小不同的圆球，可以有相同的电荷，就是说，多余的电流体相同，但是两者的电势不同，也就是说：小圆球上的电势较高，大圆球上的电势较低。在小圆球上，电流体的密度较大，因而也就更受到压缩。因此密度愈大则互相排斥的力愈大，小圆球上的电荷逃去的趋势要比大圆球上的大。这个电荷要从导体逃去的趋势就是直接测量电势的标准。为了清楚地说明电荷与电势的差别，我们必须列出几句描述受热物体的行为的句子，以及和这些句子相对应的描述带电导体的一些句子。

热	电
两个物体，最初的温度各不相同，当它们互相接触，过了一段时间后，它们就达到相同的温度	两个绝缘的导体，最初的电势各不相同，当它们相互接触后，很快就达到相同的电势
若两个物体的热容量不同，则数量相等的热会产生不同的温度变化	若两个物体的电容量不同，则数量相等的电荷会产生不同的电势变化
温度计与任何一个物体相接触，通过水银柱的高度表示它自己的温度，因而也表示物体的温度	验电器与任何一个导体相接触，通过金箔的互相分开表示它自己的电势，因而也表示导体的电势

但是，这样的比拟不能推得太远。下面的例子（图27）就指出了它们的相似点和相异点。假使一个热的物体与一个冷的物体接触，热会从热的物体流到冷的物体上去。另一方面，假使我们有两个绝缘的导体，它们的电荷相等但是符号相反，即一个有正电荷，另一个有负电荷。这两个电荷的电势各不相同。依照习惯，我们认为负电荷的电势比正电荷的电势低。假使让这两个导体相接触，或者用导线连接起来，那么根据电流体的理论，它们将显示出不带电荷，因而根本不会有电势差。我们必须想象在电势差被平衡的很短的时间内，电荷是从一个导体“流”向另

外一个导体的。但是怎样流的呢？是正的电流体流向带负电的物体，抑或是负的电流体流向带正电的物体呢？

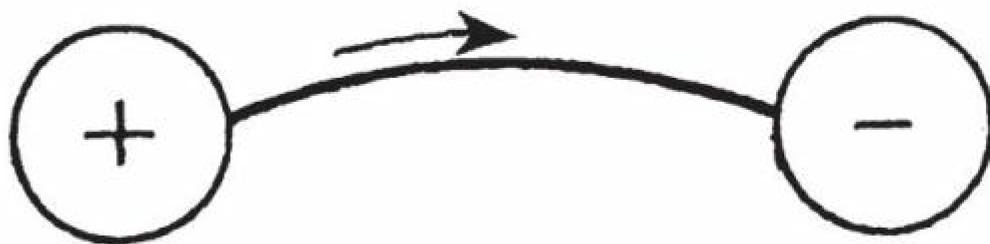


图27

事实上，单是根据这里所提到的材料，我们无法决定两者之中哪一种是对的，我们可以认为这两种流法都可能，甚至可以同时有两个方向的流动。我们知道，我们并没有一个用实验来决定这个问题的方法，而只是使它成为常规，在选择上没有什么特定意义。往后的发展得出了能回答这个问题的更深的电理论，那个答案若用简单的电流体理论来表达是完全没有意义的。在这里，我们暂且采用下面的表达方式：电流体是从电势较高的导体流向电势较低的导体。这样，在刚才所说的两个导体中，电是从带正电的导体流向带负电的导体。这种表述完全是一种习惯上的说法，而在这里则是完全武断的。所有这些困难表明，热和电之间的比拟是不可能完整无缺的。

我们已经看到，运用机械观来描述静电学的基本论据是可能的。同样，用机械观来描述磁的现象也是可能的。

磁流体

这里我们还是依照上面的方式，先叙述几种非常简单的情况，然后

去寻找它们的理论解释。

1．有两根磁棒。一根在一个架上，支点位于磁棒中间，它处于水平位置，故能自由转动；另一根拿在手里。如果使两根磁棒的一端两相靠近，那么它们之间发生了强烈的吸引。这是经常可以做到的（图28）。如果不发生吸引，我们应当把磁棒掉过头来，用另一端去试试。只要这两根棒都具有磁性，一定会相互吸引。磁棒的两端被称为它的**极**。实验再继续进行下去，我们把手持的磁棒的极沿着另一根磁棒移动过去。此时我们发现吸引力减小了，而当极达到搁起的那根磁棒的中央时，就根本没有吸引力了。如果磁极继续朝同一方向移过去，那么就会逐渐发现排斥现象，当到达搁起的磁棒的另一极时，斥力最大。

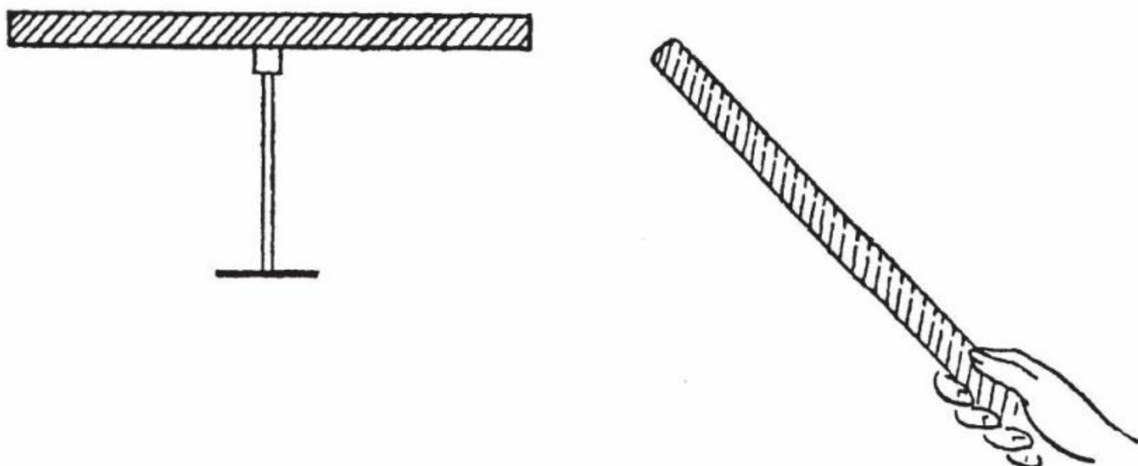


图28

2．上面的例子又引出了另外一个实验。每根磁棒都有两个极。我们难道不能够把它的一极分离出来吗？办法似乎很简单：只要把一根磁棒分成相等的两段就可以了。我们已经知道一根磁棒的极与另一根磁棒的中央之间是没有力的。但是实际上把一根磁棒折成两段，其结果却是惊人的、出乎意料的。如果我们照上面一节里所描写的实验再来做一次，不过这回是将搁起的那根磁棒折成两段，拿其中一段照样搁起来做的，结果仍是一样，本来是没有磁力影响的地方，现在居然成了很强的极了。

应该怎样解释这些情况呢？因为磁的现象也和静电的现象一样有排斥和吸引，我们可以模仿电流体的理论来建立一个磁的理论。设想有两个球形的导体，电荷相等，一个是正的，另一个是负的。这里所谓“相等”是指有相同的绝对值：例如+5和-5具有相同的绝对值。假定这两个圆球用一种绝缘体，例如玻璃棒之类连接起来。若画成图，这种装置可以用一根从带负电荷的导体指向带正电荷的导体的一支箭表示（图29）。我们把这整件东西叫作电的**偶极子**。很明显，这样两个偶极子的行为和第一个实验中的两根磁棒完全一样。假使我们把这个发明看成是一根实在的磁棒的模型，我们可以说，假定存在磁流体，则一根磁棒不是别的而是一个**磁偶极子**，它的两端具有不同类的磁流体。这个简单的理论是模仿电的理论的，用它解释第一个实验是圆满的。在一端应该是吸引，在另一端是排斥；而在中央则两种相等而相反的力互相平衡。但是，怎样解释第二个实验呢？把电偶极子的玻璃棒折断，我们可以得到两个孤立的极。折断磁偶极子的铁棒照理也应该同样有两个孤立的极，但这是与第二个实验的结果矛盾的。这个矛盾使我们不得不介绍一种更准确的理论。我们放弃前面所讲的模型，想象磁棒是由许多非常小的**基本**磁偶极子组成的，这些基本偶极子再不能被折断为孤立的极。在磁棒中有一个统帅在掌管秩序，因为所有的基本偶极子都是指着一个方向（图30）。我们将立刻知道为什么把一根磁棒折成两段以后，新的两端又变成新的两极，也知道这个更精细的理论既能解释第一个实验也能解释第二个实验。

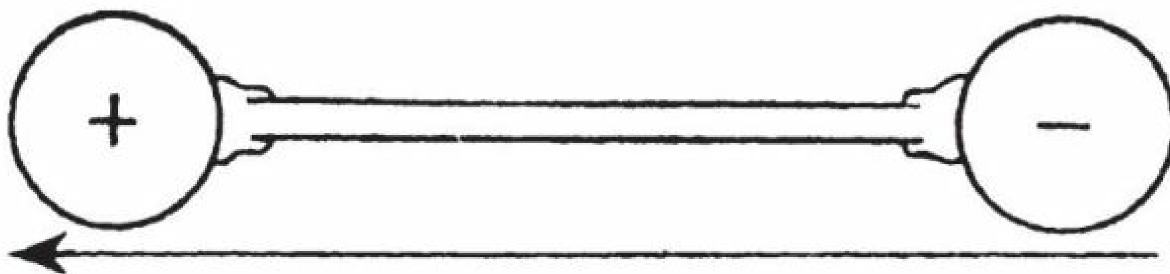


图29

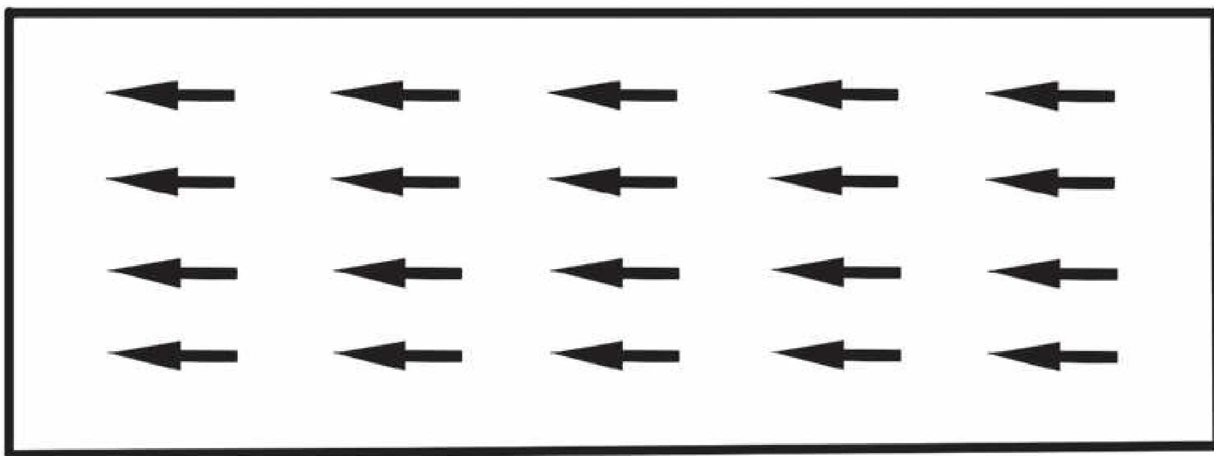


图30

有很多情况，那个简单的理论也能解释，似乎还不需要精细的理论。举例来说：我们知道磁棒会吸引铁。为什么呢？因为在一片普通的铁中，两种磁流体是混合在一起的，因此不会显出真正的效应来。把磁棒的正极移近铁，对磁流体起着“命令其分开”的作用，吸引了负的磁流体而排斥了正的磁流体，结果就产生铁和磁棒间的吸引现象。移去磁棒以后，磁流体又多少恢复到原来的状态，究竟恢复多少，要看它们“追想起”外力的命令的程度如何。

至于这个问题的定量方面则无须赘言。用两根很长的磁棒，我们就可以研究它们的两极在互相接近时的吸引或排斥的力。假设磁棒很长，棒的另一端的影响就可以忽略。引力或斥力与两极间距离的关系怎样呢？库仑实验给出的答案是这样的：这种关系与牛顿的万有引力定律和库仑的静电定律是一样的。

我们又一次看到在这个理论中应用了一般的观点，即倾向于用引力和斥力只与不变的粒子之间的距离有关而且只作用于粒子之间来解释一切现象。

这里我们提一提一件尽人皆知的事情，因为以后我们还要用到它。地球是一个大的磁偶极子。我们完全无法解释它何以如此。北极接近于地球的负（-）磁极，而南极则接近于地球的正（+）磁极。正负的名

称，不过是约定俗成的，但一旦被规定，便可以使我们决定任何别的场合中的磁极。一根装在竖向轴上的磁针会服从地球的磁力的“命令”。磁针的正（+）磁极指向北极，也就是说，指向地球的负（-）磁极。

我们虽则能一致地把机械观应用于电与磁的现象范围中，但是也不必因此特别骄傲或喜欢它。这个理论中有些部分即使不令人沮丧，也肯定不能令人满意。我们正在发明物质的新的种类：两种电流体和基本磁偶极子。我们开始感到物质实在太多了。

力是简单的。无论是万有引力、电力或磁力，都可以用同样的方法来表述。但是为了求得这个简单的表述方法，我们所付出的代价也很大，引入了许多新的、没有重量的物质。它们都是颇为牵强的概念，而且与基本的物质——质量完全无关。

第一个严重的困难

我们现在可以谈一谈应用我们的普遍哲学观点所遇到的第一个严重的困难了。后面我们还会看到，这个困难和另一些更严重的困难一起，使我们绝对不再相信一切现象都可以用机械观来解释了。

自从发现电流以后，作为科学与技术的分支的电学才有了惊人的发展。偶然的事件能产生重大的作用，这种例子在科学史上是很少见的，这里我们找到了其中的一个。蛙腿痉挛的故事有各种各样的说法。不管那些细节的真实性如何，伽伐尼（Galvani）的偶然发现使得伏打（Volta）在18世纪末发明了所谓**伏打电池**这一点是毫无疑问的。这种电池早已没有什么实用价值了，但是在学校的实验中，或在教科书中，仍一直把它用作最简单的例子来说明电流的来源。

它的构造原理是很简单的。拿几个大玻璃杯，里面装水，再加一点

点硫酸。每个玻璃杯中有两个金属片，一个为铜片，一个为锌片，都浸在溶液中。一个玻璃杯中的铜片和下一个玻璃杯中的锌片连接起来，这样就只有第一个杯中的锌片和末一个杯中的铜片没有连接。如果“元件”的数目，即构成电池组的装有金属片的玻璃杯的数目相当多，那么我们用非常灵敏的验电器就可发现第一个杯中的铜片和末一个杯中的锌片之间有电势差。

如上所述，我们只是为了可以用仪器很容易地测量电势差，所以介绍了由若干个玻璃杯组成的电池组。但在以后的讨论中，用一个玻璃杯装成的单电池就够了。我们发现，铜放出的电势比锌高些。这里所谓“高些”的意思是等于说+2比较-2要大些。假使把一个导体连接到那个空着的铜片上，另一个导体连接到空着的锌片上，则两个导体上都会有电荷，前一个有正电荷，后一个有负电荷。到此为止，还没有发现有什么了不起的新现象，我们还可以应用以前关于电势差的观念。我们已经知道两个电势不同的导体用导线连接起来以后，可以使电势差消失，因此电流体是在从一个导体向另一个导体流动的。这种过程与由于热的流动使温度相等的现象是相似的。但是，伏打电池中的电流是否也是这样流动的呢？

伏打在他的实验报告中曾说过，金属片的作用和导体一样：

> ……微弱地带电，它们不断地作用，或者说在每一次放电之后，又立刻有新的电荷；总而言之，它所供给的电荷是无穷尽的，或者说，会发生一种永远不断的电流体的作用或冲动。

这个实验的结果是令人惊异的，因为用导线把两个带电导体连接起来，电势差就会消失，而铜片和锌片之间的电势差是不会消失的。电势差既然维持不变，那么根据电流体的理论，便有电流体不断从较高的势位（铜片）流向较低的势位（锌片）。我们姑且不放弃电流体理论，可假定有一种经常的力，使电势差不断再生，因而引起电流体的流动。但

是从能的观点看来，整个现象是令人惊奇的。在电流通过的导线中产生了相当多的热量，假使导线比较纤细，甚至会被熔化。由此可知，在导线中产生了热能。但是，整个伏打电池组构成一个孤立的系统，因为没有能从外部加进来。假使我们不愿放弃能量守恒定律，便必须找出能的转换发生在什么地方，热是由哪种能转换而来的。我们很容易理解，在电池中正发生着很复杂的化学变化过程；在这个过程中，溶液及浸在其中的铜片和锌片都是起作用的。从能的观点看来，转换的程序是这样的：化学能流动的电流体即所谓电流的能热。一个伏打电池组不能永远使用下去，化学变化和电的流动经过一段时间以后，便会使电池组失效。

有一个实验把应用机械观的巨大困难揭露了出来。这个实验初听起来是很奇怪的。它是奥斯特（Oersted）在约120年前所做的。他这样写道：

> 这些实验似乎已表明：我们可以用一个伽伐尼装置使磁针移动自己的位置，但是只有在伽伐尼电路闭合时才有这种现象，而不是在电路断开时。几年以前，某些极有名的物理学家仍想在电路断开时使磁针移动位置，但毫无结果。

假设我们有一个伏打电池组和一根金属导线。如果把导线连接在铜片上，而不连接在锌片上，便会发生势差，但是不会有电流。假设把导线弯成一个圈，在它的中央放上一根磁针，导线和磁针都在同一平面上。在导线不接触锌片时，不会有什么现象发生。没有任何力在作用，所存在的势差对磁针的位置不会产生任何影响。我们简直不懂为什么奥斯特所说的那些“极有名的物理学家”会去期待这种现象的发生。

现在让我们把导线连接在锌片上。奇怪的现象立刻发生了。磁针离开了它原来的位置。假使用书的平面代表圈的平面，则磁针的两极中有一个极正指向读者（图31）。这个效应表明，有一种**垂直**于圈平面的力

作用在磁极上。在实验的事实面前，我们不可避免地会做出结论，认为力作用的方向是垂直的。

这个实验之所以重要，一方面是因为它表明了在两种外观上完全不同的现象，即磁和电流之间的关系。还有一方面更重要，磁极和通过电流的导线的一小部分之间的作用力，不是在沿连接金属线和针的直线上，也不是在沿连接流动的电流体的粒子和基本磁偶极子的直线上。力是与这些直线垂直的。按照机械观，我们应该把外在世界的一切作用力都化成一种类型，而现在我们已经第一次发现有一种力跟以前所发现的力不同了。我们记得那些服从牛顿定律和库仑定律的引力、电力、磁力都是沿着连接于相互吸引或相互排斥的物体的一条直线而作用的。

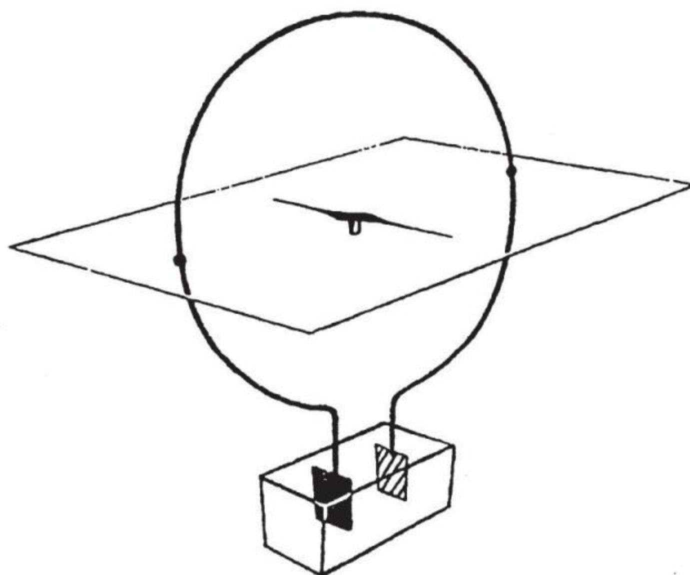


图31

在大约60年以前，罗兰（Rowland）做了一个很精巧的实验，把这种困难显示得更加清楚。我们把实验的技术细节丢开不谈，只叙述实验的大意。设想一个小的带电圆球（图32）。再设想这个圆球沿着圆形轨道很快地运动，在圆的中心放一个磁针。在原则上，这个实验和奥斯特的是一样的，唯一不同的是不用通常的电流，而用一种带电体使它发生机械运动。罗兰发现这一结果和电流通过圆形导线时所观察到的结果相同。磁针受一个垂直的力的影响而发生偏转现象。

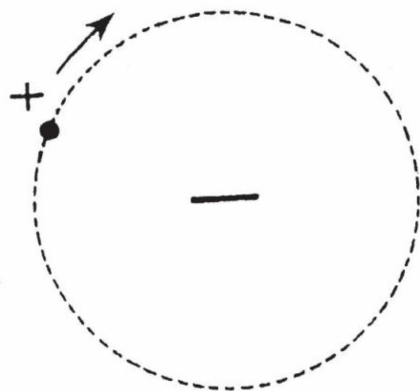


图32

现在我们使带电体运动得更快些，这样，作用于磁极的力增大了，磁针从原来的位置偏转得更显著了。这个观察显示了另一个严重的困难。不仅力不在连接磁针与电荷的直线上，而且力的强度与带电体的速度有关。整个机械观是建立在一个信念上的，即认为一切现象都可以用只与距离有关而与速度无关的力来解释。罗兰的实验结果推翻了这个信念。可是我们还能够持保守态度，仍旧在旧的观念范围内找寻解答。

当一个理论很顺利地发展时，突然会出现一些出乎意料的阻碍，这种困难在科学上常常发生。有时把旧的观念加以简单推广似乎是一个解决困难的好办法，至少暂时解决困难是可以的。例如在现在这个例子中，似乎把过去的观点推广，而在基本粒子之间引入一些更加普遍的力就够了。可是旧理论往往已无法弥补，而困难终于使它垮台，于是新的理论随之兴起。在这里，不是单单一个小小磁针的行为把表面上很巩固、很成功的机械论打倒了。另一个更有力的攻击是从完全不同的角度发起的。但是这是另一个故事，我们以后再谈吧。

光的速度

在伽利略的《两种新科学》一书中，我们可以听一听教师和他的学生间关于光的速度的谈话：

> 萨格雷多（Sagredo）：我们应该认为光的速率是属于哪一类呢？它有多大呢？光的运动是瞬时的，还是像其他物体一样需要时间呢？我们能用实验来解决这个问题吗？
>
> 辛普利西奥（Simplicio）：日常经验告诉我们，光的传播是瞬时的，因为当我们看见远处开炮时，闪光不需时间便传到了眼睛，但是声音却是在一个显著的时间间隔以后才传到耳鼓来。
>
> 萨格雷多：那么，根据这一点熟悉的经验，我们只能推论传到我们耳鼓的声音比光传播得慢些，它并没有告诉我们光的传播是瞬时的，或者说它传播得非常快，但总是需要时间的……
>
> 萨尔维亚蒂（Salviati）：这些观察以及其他类似的观察中所得到的一点点结论使我想出了一个可以用来精确地决定光的传播是否瞬时的方法……

萨尔维亚蒂继续解释他的实验方法。为了了解他的观念，我们不妨设想光的速度不仅是有限的，而且是很小的，光的运动慢下来了，像慢动作的电影一样。甲和乙两个人都拿着遮起来的灯相距1英里站着。第一个人甲打开了他的灯。这两个人已经预先约好，乙看见甲的光就立刻打开自己的灯。假定在这里所说的“慢动作”中，光每秒钟走1英里。甲把灯上的遮盖物拿开，于是一个信号就送出去了。乙在1秒钟之后看到这个信号并发出一个回答的信号。甲在发出自己的信号之后2秒钟收到乙的信号。假使光的速度是每秒1英里，则甲在发出和接到离他1英里的乙的信号之间要经过2秒钟。反过来说，如果甲不知道光的速度，但假定他的同伴是遵守约定的，他若看见在打开自己的灯以后2秒钟，乙的灯也打开了，他就可以断定光的速度是每秒1英里。

以当时的实验技术，伽利略自然无法用这种方法测定光的速度。假

使距离是1英里左右，他必须将时间间隔测到十万分之一秒的数量级。

伽利略提出了测定光速的问题，但是却没有解决它。提出一个问题往往比解决一个问题更重要，因为解决一个问题也许仅是一个数学上或实验上的技能而已。而提出新的问题、新的可能性，从新的角度去看旧的问题，却需要有创造性的想象力，而且标志着科学的真正进步。惯性原理、能量守恒定律，都只是运用新的和独创的思想去对付已经熟知的实验和现象所得来的。在本书的后续篇幅中，我们还将看到很多这样的例子，其中特别强调用新的观点来研究已知情况的重要性，并描述一些新的理论。

我们再回到比较简单的决定光速的问题上来吧！很奇怪，伽利略居然没有想到他的实验可以更简单、更准确地由一个人做出来。他不必请一个伙伴站在远处，只要在那里安置一面镜子就够了，镜子接到光以后，便立刻自动地送回一个信号。

大约在250年之后，这个了不起的原理才被斐索（Fizeau）利用，他是第一个用地面上的实验（terrestrial experiment）来测定光的速度的人。在斐索之前，已经有勒麦（Roemer）用天文观察测定了光的速度，可是精确度很差。

这是十分明显的，由于光的速度非常大，要测量它，必须利用一个相当于地球与太阳系中的另一个行星之间的距离那样大的距离，或者须使用极精巧的实验技术。第一种方法就是勒麦所用的方法，第二种就是斐索所用的方法。在这些最早的实验之后，这个代表光速的非常重要的数字，又做了很多次测定，而且愈来愈精确了。在20世纪，迈克尔逊（Michelson）为了这个目的设计了一种极精巧的仪器。这些实验的结果可以被简单地表示为：光在**真空**中的速度约为每秒186 000英里。

作为物质的光

我们再从几个实验论据讲起。刚才所引用的数字是光在**真空**中的速度。光在真空中以这种速度穿过是不受干扰的。把一个空的玻璃容器中的空气抽去，我们还可以透过它看东西。我们看到行星、恒星、星云，可是它们的光必须经过真空才能到达我们的眼睛。不论容器中有无空气，我们都能透过它看见东西，这个简单的论据表明空气的有无是无关紧要的。因此，我们做光学实验时，在一间普通的房间内所做的效果和在没有空气的地方所做的效果一样。

最简单的光学论据之一是光的传播是直线的。我们来描述一个能证明这个论据的原始的简单实验。在点光源前放一个开有小洞的屏。点光源是一个非常小的光源，例如在一个遮盖起来的灯上的一个很小的缺口就是点光源。由于屏上有缺口，在很远的墙上的暗的背景上现出了光斑。图33表明了这个现象跟光的直线传播的关系。所有这些现象，甚至是现出光、影和半影的更复杂的那些情况，都可以用光在“真空”和在空气中沿直线传播的假定来解释。

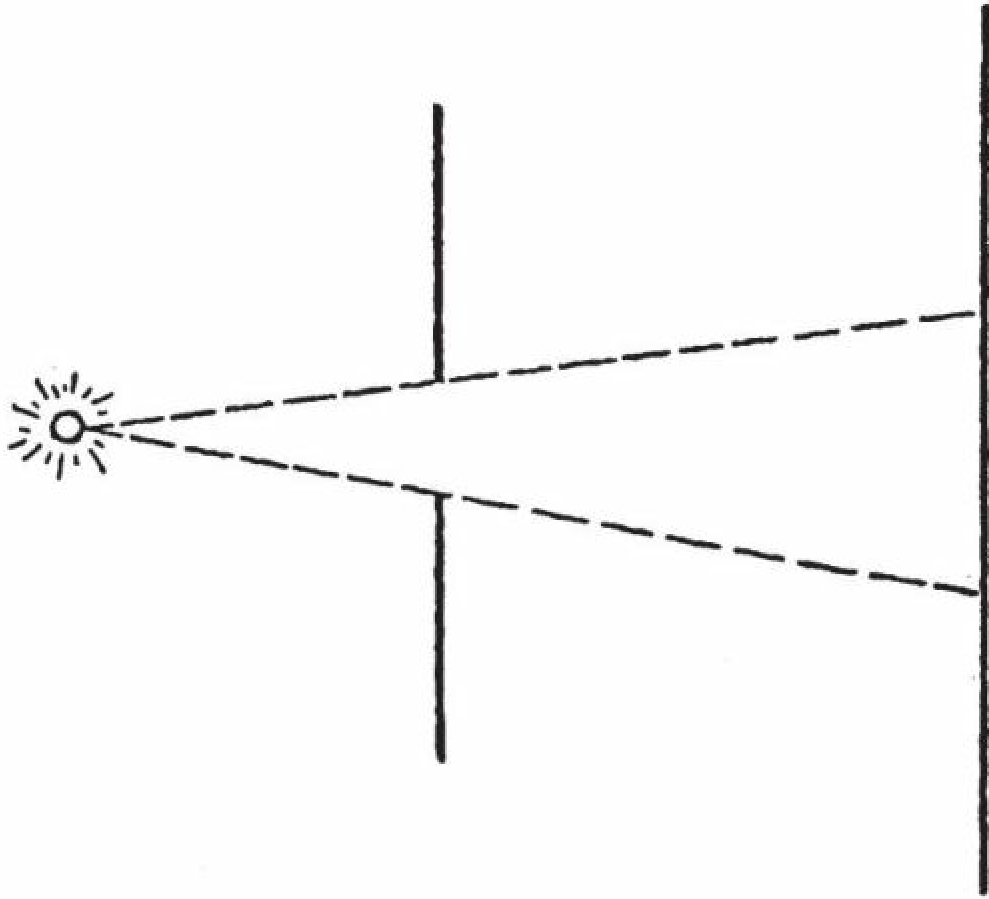


图33

我们另外举一个光通过物质的例子。假设有一束光通过真空，落在玻璃片上。结果会怎样呢？如果直线运动的定律仍然是有效的，那么光束的路线就应像图34中的虚线那样。但实际上不是这样。光束的路线像图上那样折转了。这种现象叫作**折射**。把一根棍子的一半浸在水里，看起来这根棍子的中间处像是折断了的。这是大家都熟悉的现象，它便是许多折射现象中的一个例子。

这些论据足以说明怎样去想出一个简单的光的力学理论，我们在这里的任务是要指出物质、粒子和力的观念是怎样进入光学的范围内去的，并且这种旧的哲学观点最后是怎样崩溃的。

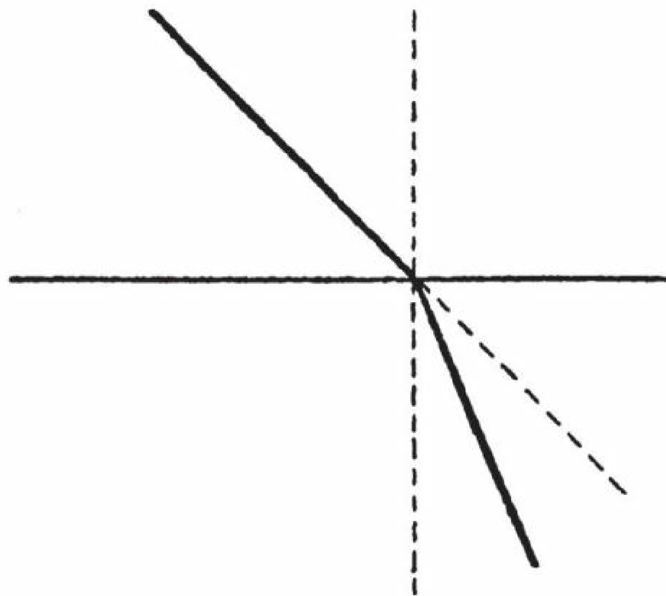


图34

在这里所提出的是这个理论的最简单和最原始的形式。我们假定所有的发光物体都发射光的粒子或**微粒**，这些微粒落到我们的眼睛上便产生光的感觉。我们为了对现象做力学的解释，已经很习惯于引用新的物质了，因此现在可以不必踌躇，再来引用一种新的物质。这些微粒必须以已知的速率在真空中沿直线运动，而把消息由发光体带到我们的眼睛。所有表现光的直线传播的现象都支持微粒说，因为通常都认为微粒的运动正是直线运动。这个理论也很简单地解释了光在镜子上的反射，认为这种反射跟图35中所示的那种在力学实验中所观察到的弹性球撞在墙上的反射一样。

对折射的解释稍为困难一些。如果不做细致的考察，我们有可能用这种力学的解释来进行。假使微粒落在玻璃面上，可能玻璃中的物质粒子对它们施力，这种力只能在最邻近物质的地方才发生作用。我们已经知道，任何作用在运动粒子上的力都会改变它的速度。如果作用在光的微粒上的力是垂直于玻璃表面的引力，那么光束的新的运动路线将会在原来的路线与垂直线之间。看来这种简单的解释会使光的微粒说得到很大的成功。可是要决定这个理论的适用性和有效范围，我们必须研究新

的和更复杂的情况。

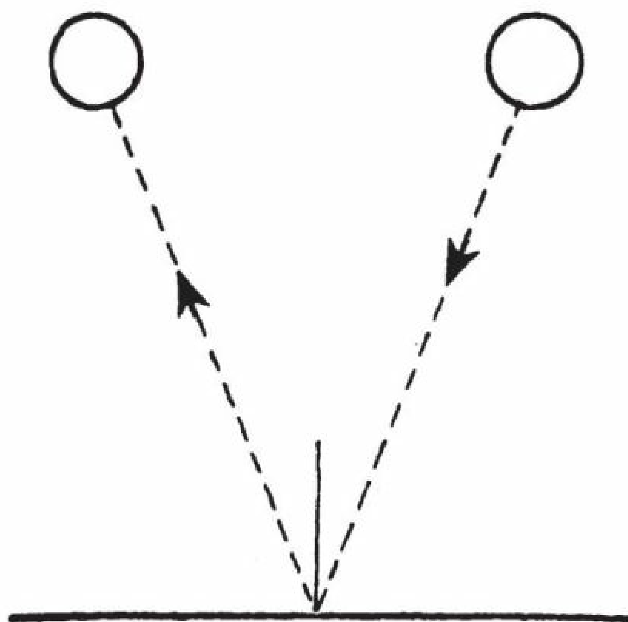


图35

色之谜

首先解释自然界中这么多色的不是别人，又是天才的牛顿。这里引用牛顿自己描写他的一个实验的一段话：

> 1666年（那时我正在磨制球面玻璃以外的其他形式的光学玻璃），我做了一个三角形的玻璃棱柱镜，利用它研究色的现象。为了这个目的，我把房间弄成漆黑的，在窗户上做一个小孔，让适量的日光射进来。我又把棱镜放在光的入口处，使光能够折射到对面的墙上去。当我第一次看见由此产生的鲜明的强烈的光色时，我感到极大的愉快。

太阳发出的光是“白”的。透过棱镜以后，它便现出可见世界中存在着的所有的色。自然界本身在彩虹的美丽的色中也表现出同样的结果。自远古以来，人们就企图解释这种现象。《圣经》中说，彩虹是上帝与人类订盟约的一个记号，在某种意义上来说，这也算是一种“理论”。不过它不能圆满地解释何以彩虹会常常发生，而且总是与雨有连带关系。在牛顿的伟大的著作中才首先用科学的方法攻破了色之谜，而且对彩虹做了解释。

彩虹的一条边总是红的，而另一条边总是紫的。在这两条边之间排列着所有其他的色。牛顿对这种现象的解释是这样的：在白光中已经存在了各种色。所有的色混在一起越过星际空间和大气而呈现白光的效应。白光可以说是不同色的各种微粒的混合体。在牛顿的实验中，棱镜把它们各自分开了。根据力学理论，折射是由于从玻璃的粒子所发出的力作用在光的粒子上所致。这些力对不同的色的微粒所贡献的作用也不同，对紫色的力最大，而对红色的力最小。因此在光离开棱镜以后，每种色的微粒就会沿着不同的路线折射而互相分开。而在彩虹中，雨点的作用便等于棱镜的作用。

现在，光的物质论比以前更复杂了。光的物质不止一种而有很多种，不同的色就有不同的物质。可是假使这个理论有几分真实，它的结论必须跟观察相符。

像牛顿的实验中所显现的太阳的白光中的色系叫作太阳的**光谱**，或者更确切些说，它的**可见光谱**。像上面所说那样把白光分解为它的各个组元叫作光的**色散**。假如上面的解释不错，则光谱中分开来的色可以用第二个完全校准的棱镜再混合起来。这个过程应该恰恰和前面的相反。我们应该从前面已经分开了的光得到白光。牛顿用实验证明，确实可以用这种简单的方法从白光的光谱得到白光，也可以从白光得到光谱，无论要做多少次都可以。这些实验成为光的微粒说的强大的支持力量，因为这个理论是认为每种色就有一种微粒，而各种微粒都是不变的物质。牛顿写道：

> ……那些色不是新产生的，而只是在分开以后才能使它显现出来；因此假如再把它们混合起来，它们又会合成分开以前的那种色。同理，把许多种色混合起来所发生的变化是不真实的；因为如果这些不同种类的射线再分开，它又会表现在进入混合以前的那种色了。你们知道，蓝色与黄色的粉假如很细致地混合起来，则在肉眼看来是绿色的，可是作为组元的那些微粒的色，却并不因此在实际上有所变化，而只是混杂起来罢了。因为只要用一副很好的显微镜去看，它们还像以前一样，仍旧是蓝色粉和黄色粉互相混杂起来的。

假设我们已经把光谱中很狭窄的一个条子分离出来。这就是说，在许多色之间，我们只让一种色通过缝隙，其余的用屏挡住。通过缝隙的光束便会是一种单色光，就是说，不能再被分解为有几个组元的光。这是这个理论的结论，而且它很容易用实验加以确认。这种光束不管用什么方法都不能再被进一步分解。要获得单色光的光源，方法很简单。例如钠在炽热时就发出单色黄光。用单色光做某些光学实验总是很方便，因为实验的结果会简单得多，这是我们很容易理解的。

让我们想象突然发生了一件奇怪的事：太阳只射出某一种色的，例如黄色的单色光。那地球上的种种色都会立刻消失，任何东西都是黄的或黑的了。这个预言是光的物质论的一个结论，因为新的色是不能被创造的。它的有效性可以用实验来确认：在一个只有炽热的钠作为光源的房内，任何东西都是黄的或黑的。地球上这么多的颜色反映为组成白光的各种色。

光的物质论在所有这些例子中似乎都很圆满，不过它必须为每种色引用一种物质，这会使我们感到有些困惑；而关于所有的光的微粒在真空中都有完全相同的速度的假说也似乎很牵强。

我们可能想象出另一套假定和另一个性质完全不同的理论，它也同样圆满，同样能够给出所有需要的解释。我们将很快看到另一个理论的兴起，它虽然基于完全不同的概念，但能够解释同样的光学现象。可是

在提出这个新理论的基本假设之前，我们必须回答一个与这些光学现象毫无关系的问题。我们必须回到力学方面来，并且问一问：

波是什么

在伦敦发生的一个谣言很快就会传到爱丁堡，可是没有一个传播谣言的人曾经往来于两城之间。这里有两类不同的运动，一种是谣言由伦敦到爱丁堡的运动，另一种是传播谣言的这些人的运动。

风经过麦田，会激起一个波，这个波越过整个麦田传播出去。这里我们又必须区别波的运动与每株麦的运动，每株麦只经受微小的摆动。我们都看到过，把一个石子丢到水池中，会产生一些波，它以愈来愈大的圈子传播出去。波的运动与水的粒子的运动极不相同。粒子只做上下运动。我们所观察到的波的运动是一种物质的状态的运动，而不是物质本身的运动。浮在波上的一个软木塞清楚地表明了这一点，因为它是模仿水的实际运动而上下运动，而并不被波带走。

为了更好地了解波的机构，我们又要设想一个理想实验。假定一个大的空间完全均匀地充满水或空气，或其他的“介质”。在中央处有一个球（图36）。在实验之初，没有任何运动。

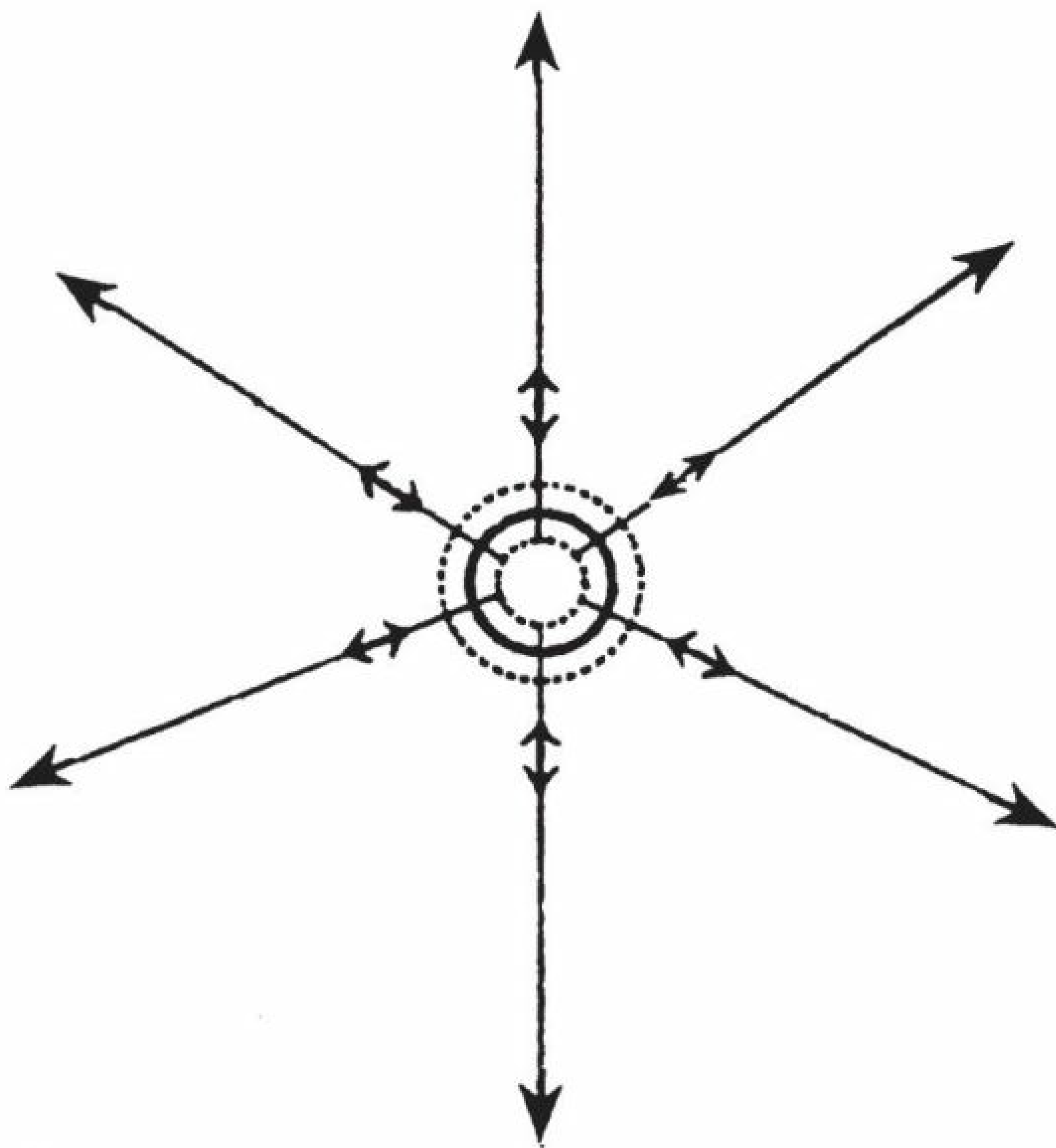


图36

突然之间，这个球有韵律地“呼吸”起来，它的体积一下膨胀，一下收缩，不过它的球形始终保持不变。介质会发生些什么事情呢？我们从球开始膨胀的时刻开始考察。直接邻近球的介质的粒子都被向外推出，以至于那一层球壳形的水或空气的密度都增加到超过它的正常值。同样，当圆球收缩时，环绕着它的最邻近的那一部分介质的密度便会减小。这些密度的变化会传遍整个介质。构成介质的粒子只做小的振动，但是整个运动却是一个前进波的运动。这里有一个重要的新的情况，便

是我们第一次考察到一种不是物质的运动，而是借助于物质而传播的能的运动。

以脉动的圆球为例，我们可以引入两个物理概念，这些概念对描写波是很重要的。第一个概念是波的传播速度。这是与介质有关的，例如水与空气就不同。第二个是**波长**的概念。若是海上或河上的波，其波长便是从一个波谷到第二个波谷的距离，或者从一个波峰到第二个波峰的距离。海波的波长比河波的大。至于我们这个由脉动的圆球所引起的波，其波长则为在某种确定的时间内表现密度最大或密度最小的两个邻近的球壳形介质间的距离。很明显，这种距离不单与介质有关，圆球的脉动率当然也会有很大的影响，脉动愈快波长愈短，脉动愈慢波长愈长。

波长的概念在物理学中是用得非常成功的。它肯定是一个力学概念。波的想象可以简化为粒子的运动，而根据动力论，粒子是物质的组元。因此一般说来，任何一个应用波的概念的理论都可以被看作一种力学理论。例如声学现象便主要是根据这个概念来解释的。振动的物体，例如琴弦和人的声带，都是声波的源，而声波在空气中的传播，和前面所解释的脉动圆球所造成的波的传播一样。因此我们可以利用波的概念，把所有的声学现象都归结为力学现象。

前面已经着重说过，我们必须区别粒子的运动与波本身的运动，而波只是介质的一种状态。这两种运动是极不相同的，但是很明显，在脉动的圆球的例子中，两种运动都是沿着同一直线。介质的粒子沿着很短的线段而振动，而密度则随着这种运动按周期而增减。波传播的方向与振动的方向是相同的。这类波叫作**纵波**。但这是唯一的一种波吗？为了有利于往后的考察，我们必须理解还可能有另一种不同的波，被称为**横波**。

让我们改变前面的例子。我们仍用一个圆球，不过把它浸在另一类介质中；不用空气或水而用胶状的介质，而且，圆球不再是脉动的，而是先朝一个方向转一个小的角度，然后朝相反的方向转回，并一直以相

同的韵律绕着确定的轴转动。胶状物黏附于圆球，其黏附的部分便被迫做模仿圆球的运动。这些部分又使再稍微远一点的部分模仿同一运动。这样模仿下去，于是在介质中便产生了波。假如我们还记得介质运动与波的运动的区别，便会知道这两种运动不是在同一条直线上。波是朝圆球的半径的方向传播的，而介质的每部分的运动则与这个方向垂直，这样便构成了横波。

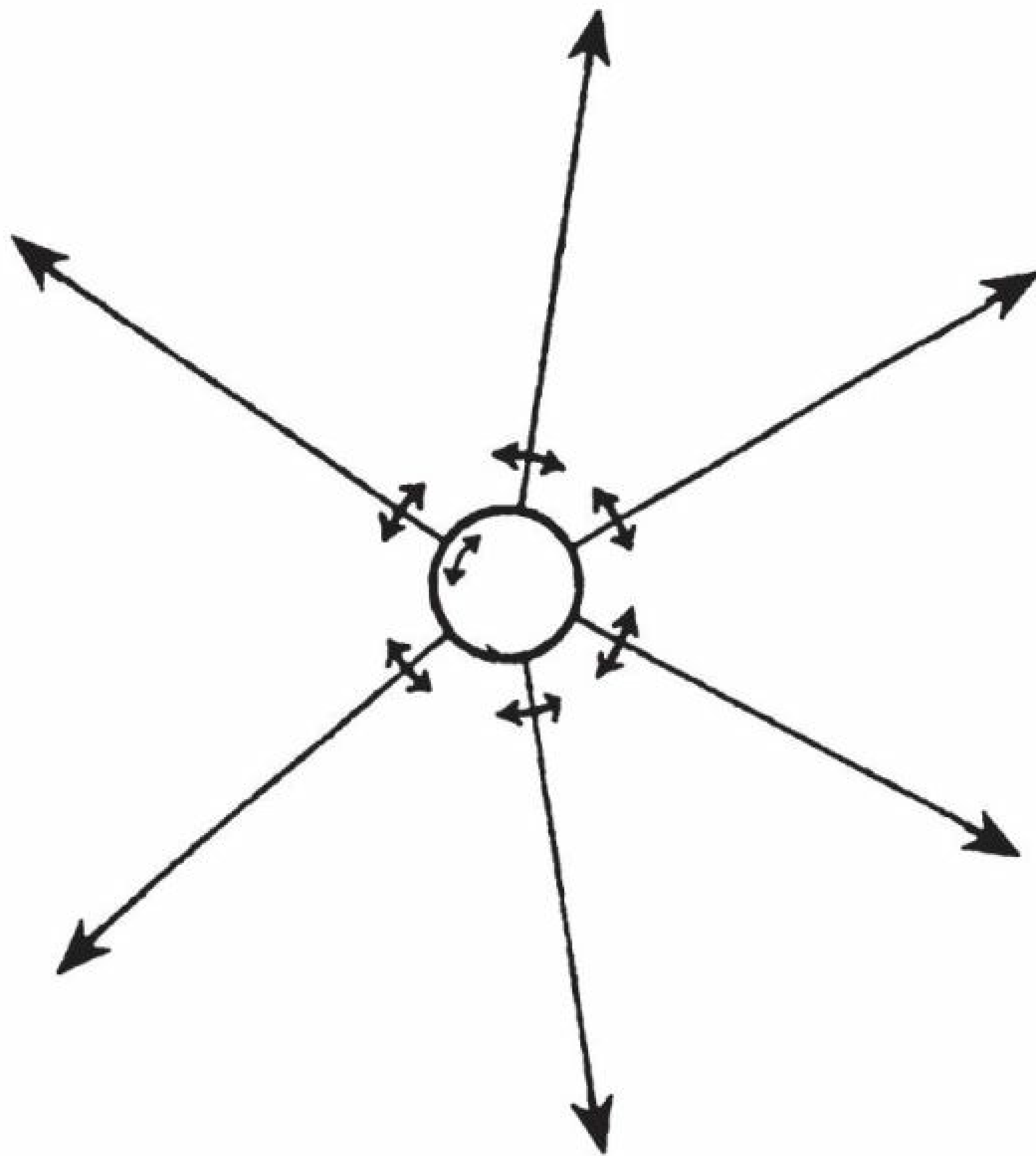


图37

在水面上传播的波是横波。一个浮动的软木塞上下跳动，而波却沿

水平面传播。在另一方面，声波是最熟悉的纵波的一个例子。

还有一点：在一种均匀的介质中，由一个脉动的或振动的圆球所产生的波是**球面波**。之所以这样称呼它，是因为在任何一定的时间，围绕着源的介质的任何圆球上的任何点的行为都相同。我们试着考察离源很远的介质的一个圆球的一部分（图38）。这一部分离得愈远并且取得愈小，愈像一个平面。假如不求太严格，我们可以说，平面的一部分和一个半径相当大的圆球的一部分并没有很重要的区别。我们常常把离源很远的一个球面波的一部分称为**平面波**。我们把图上画出影线的部分放得离球心愈远，而且把两个半径之间的夹角取得愈小，则愈能体现平面波的概念。平面波的概念也和许多别的物理概念一样，不过是一种假定，它只有某种程度的正确性。可是这是一个有用的概念，我们以后还要用到它。

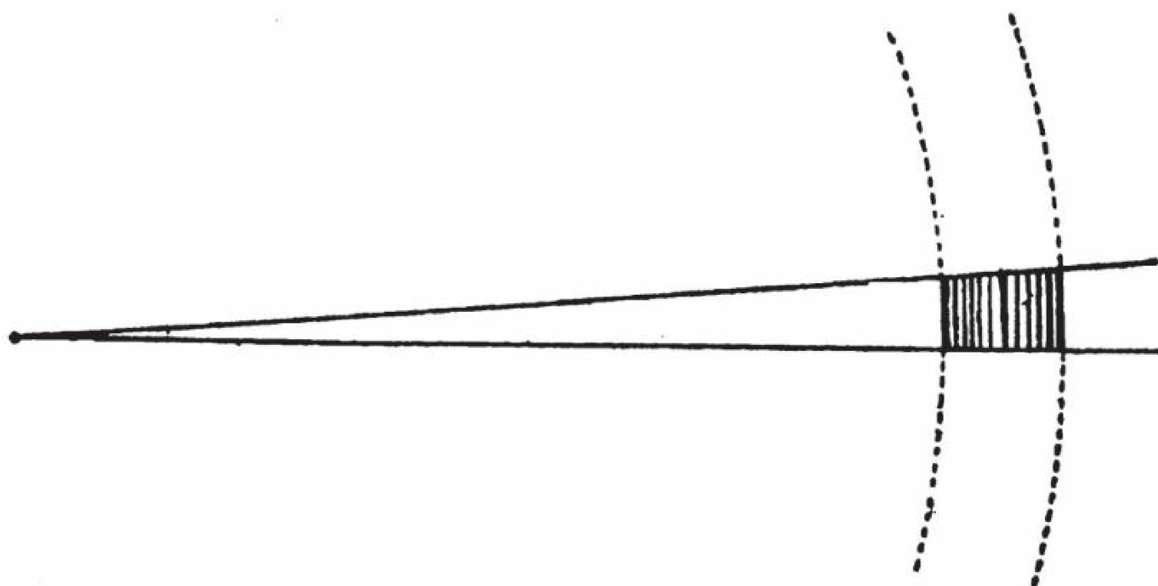


图38

光的波动说

让我们回忆一下前面描写光学现象时突然停下来的原因。我们当时的目的是要介绍另一个光的理论，这个理论与微粒说不同，但也想做到能解释同样多的情况。因此，我们不得不中断我们的故事而来介绍波的概念。现在，我们可以回到原题上来了。

第一个提出一个全新的光的理论的人是和牛顿同时代的惠更斯（Huygens）。在他关于光学的论文中，他写道：

> 假如光的通过需要一定的时间——这正是我们现在要考察的——则这种在介质中传播的运动是一个接着一个的；因此它是和声一样以球面及波的形式传播的；我之所以把它叫作波，是因为它与石子被丢在水上所激起的波相似，这些波也是相继地以一个个的圈子传播出去，不过它们产生的原因不同，而且只在平面上。

照惠更斯的说法，光是一种波，它是能的迁移而不是物质的迁移。我们已经知道微粒说解释了许多已观察到的情况。光的波动说也能做到这一点吗？我们必须把微粒说已经回答了的问题再问一遍，看光的波动说是否也能回答得同样好。我们试采用谈话的方式，谈话的一方是牛顿学说的信奉者，简称为“牛”，另一方是惠更斯学说的信奉者，简称为“惠”。两个人都不许利用这两位大师死后所发展的论证。

牛：在微粒说中，光的速度具有完全确定的意义，那就是微粒通过真空的空间的速度。在波动说中，它的意义是怎样的呢？

惠：自然，它就是光波的速度。每个人都知道波是以某种确定的速度传播的，光波当然也是这样。

牛：这看来不像那样简单吧！声波是在空气中传播的，海波是在水中传播的。每一种波都必须有一种具体的介质才能在其中传播，但是光能透过真空，而声不能。假定一种真空中的波实际上就等于根本没有假定任何波。

惠：是的，这是一个难点，不过对我来说这并不是一个新的困难。我的老师已经仔细想过这个问题，而认为唯一的出路便是假定一种假设的物质——**以太**的存在，这是一种充斥于整个宇宙的透明的介质。整个宇宙可以说是浸在以太之中。一旦我们有勇气引用这个概念，其余一切都是明白而确切的了。

牛：但是，我反对这样一个假定。首先，它引用了一个新的虚假的物质，而物理学中的物质已经太多了。其次，还有一个反对它的理由：毫无疑问，你相信我们必须用力学来解释一切，但是怎样来解释以太呢？你能回答下面这个简单的问题吗：以太是怎样由基本粒子组成的，而且在其他现象中，它是怎样出现的？

惠：您的第一个反驳当然有道理。但是引入稍为牵强的没有重量的以太以后，我们便可以立刻放弃更为牵强的光的微粒。这里我们只有一种“神秘的”物质，而不至于有与光谱中的许多种色相对应的无数的物质。你不觉得这实在是一个进步吗？至少，所有的困难都集中在一点上了。我们不再需要虚伪地假定各种色的粒子都以相同的速率通过真空了。您的第二个反驳也是对的。我们不能够对以太做一个力学的解释。但是毫无疑问，对光学的现象以及其他现象的后续研究中也许会显示出以太的结构来。目前我们必须等待新的实验与结论，但是我希望最后我们总能够解决以太的机械结构问题。

牛：我们暂且抛开这个问题，因为目前无法解决它。即使我们撇开那些困难，我还想知道你的理论如何去解释那些被微粒说解释得很明白而容易理解的现象。例如：光线沿直线在“真空”或空气中通过的情况。把一张纸放在灯的前面，结果会在墙上产生一个清晰的、轮廓分明的影。假如光的波动说是正确的，清晰的影绝不可能有，因为光会绕过纸的边缘，使影变得模糊。您知道，在海洋中，小船不能阻挡波，波会绕过它，也不会出现小船的影子。

惠：这不是一个能使人信服的论证。试看河里的短的波打在大船的边上。在船的这一面发生的波在另一面就看不到。如果波十分小而船十

分大，便会出现一个清晰的影。我们之所以觉得光是沿直线行进的，很可能是因为它的波长比普通的障碍物以及实验中所用的孔小得多。如果我们能够做出一个足够小的障碍物，很可能会什么影也没有。要制造一个能够证明光是否能被弯曲的仪器，我们可能会遇到很大的实验上的困难。可是，如果能设计出这样一个实验，就能对光的波动说和微粒说之间下一个判决性的结论了。

牛：光的波动说也许在将来能导致新的论据，但是现在我不知道有任何可以确认它的实验资料。除非用实验确实证明光会弯曲，我看不出有什么理由不相信微粒说。这个学说，在我看来比波动说简单，因而也就更好。

虽然这个问题还没有被彻底解决，但在这一点上，我们可以中止谈话了。

我们还需要说明光的波动说怎样去解释光的折射和色的多样性。我们知道光的微粒说能够做出这种解释。我们从研究折射开始，但是将首先考察一个与光学毫无关系的例子，因为这对考察折射现象很有用处。

假设在一个空旷的场地上，有两个人拿着一根坚实的棍子在走路，棍子由两人各执一端（图39）。只要开始时他们以相同的速度笔直向前走去，只要两人的速度保持一样，那么不论速度的大小如何，棍总是做平行的位移，就是说，它的方向不会改变。棍的连续不断的所有位置都是相互平行的。但是现在我们设想在一极短的时间之内，也许只有几分之一秒，两个人走路的速度不同了。会发生什么情况呢？很明显，在这一瞬间，棍子转向了，因此它不再对原有的位置做平行位移了。等到恢复为相等的速度时，它的方向已经与原来的方向不同。这在图中已明显地表现出来了。方向的变更发生在两个行路者的速度不同的瞬间。

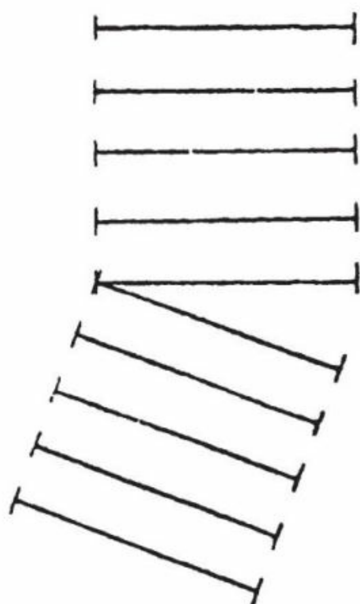


图39

这个例子使我们能了解波的折射。一个在以太中行进的平面波碰在玻璃表面上。在图40中，我们可以看到一个具有比较大的波前的波在向前行进。波前是一个平面，在任何时刻，这个平面上的以太的各部分行为相同。因为光的速度依光所通过的介质而异，因此光在玻璃中与在“真空”中的速度不同。在波前进入玻璃的极短时间内，波前的各个部分各有不同的速度。很明显，已经到达玻璃的那部分便会以玻璃中的光的速度运动，而其余部分则仍以光在以太中的速度运动。由于“浸”入玻璃时波前各部分的速度不同，波本身的方向便有了变更。

由此可见，不仅光的微粒说，而且光的波动说也可以解释折射。假如再加上一点儿数学知识做进一步的考察，便会发现光的波动说的解释更简单、更好，而且结果与观察完全相符。事实上，如果我们知道一束光进入介质时的折射情况，则定量的推理方法可以使我们推出折射介质中的光速。直接测量的结果圆满地确认了这些预言，因而也确认了光的波动说。

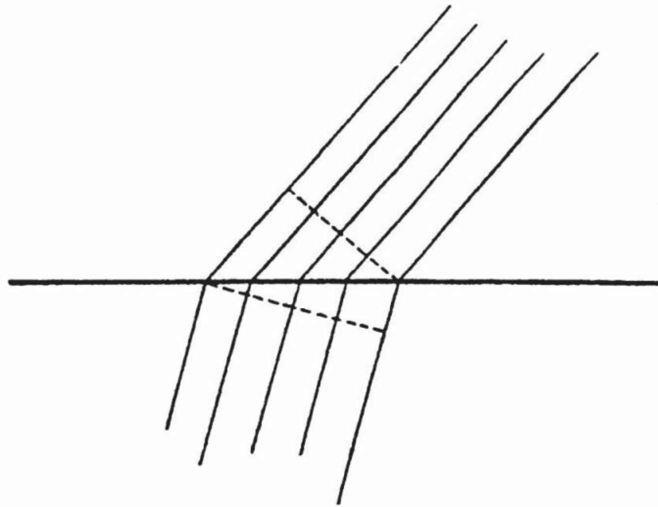


图40

现在还留下一个关于色的问题没有解决。

必须记得，一个波是用两个数来表示的，即它的速度和波长。光的波动说的主要假定是：**各自的色有各自的波长**。黄色的单色光的波长与蓝色光的或紫色光的波长不同。现在，我们已经有用波长来自然地区别光色的办法，它可以代替按不同的色来勉强地分为不同的微粒的办法。

因此牛顿的关于光的色散的实验可以用两种不同的语言来描述，即微粒说的语言和波动说的语言。举例如下：

微粒说的语言	波动说的语言
归属于不同的色的微粒在“真空”中速度相同，但在玻璃中则不同。 白光是归属于不同的色的微粒的组合，而在光谱中它们是分开的。	归属于不同的色的波长不同的光线，在以太中速度相同，但在玻璃中则不同。 白光是各种波长的波的组合，而在光谱中它们是分开的。

同一种现象出现了两种不同的理论，为了避免这种混乱的情形，最好把两者的优缺点做一番细致的研究，然后决定赞成哪一种。但是听过“牛”与“惠”之间的谈话以后，我们知道这不是一件容易的工作。目前

要做出决定，与其说是根据科学的确证来决定的，还不如说是根据兴趣来决定的。在牛顿时代以及其后的百余年间，大多数物理学家都赞成微粒说。

后来在19世纪中叶，历史做出了它自己的判断——它赞成波动说而反对微粒说。在“牛”和“惠”的对话中，“牛”说过，这两个理论之间的争论原则上是可以用实验决定的。微粒说不允许光弯曲，而要求出现清晰的影。而在另一方面，依照波动说，一个十分小的障碍物不会投下任何影子。在杨（Young）和菲涅耳（Fresnel）的研究成果中，这个结果居然用实验方法实现了，而且理论上的结论也推出来了。

我们已经讨论过一个极端简单的实验，这个实验把一个有孔的屏放在点光源之前，就会在墙上现出影来。我们把这个实验再简化些，假定光源是发射单色光的。为了得到最好的结果，必须用强的光源。我们设想屏中的孔做得愈来愈小。假如我们用很强的光源，而把孔做得十分小，便会有一种新奇的现象出现，这种现象从微粒说的观点来看是很令人费解的。光亮和黑暗之间不再有明显的区分了。光成为一连串的光环与暗环，渐渐消失于暗的背景中。环的出现正是光的波动说的最好表现。对于光环和暗环相互交替的原因，要在一个稍微不同的实验里才会得到清楚的解释。假设我们有一张黑纸，纸上有两个针孔，让光通过这两个小孔。如果两孔非常接近又非常小，如果单色光的源非常强，在墙上则会现出许多光带与暗带，它们在边上渐渐消失于暗的背景中。解释是很简单的。暗带就是从一个针孔射出的波的谷和从另一个针孔射出的波的峰相遇之处，因为它们是相互抵消的。光带则为从不同针孔里射出来的两个波的两谷或两峰相遇之处，因为它们是相互加强的。若是在前一例子中，我们对暗环与光环的解释就要复杂得多，因为那里所用的是只有一个孔的屏，但原理是一样的。通过两个孔就现出光带和暗带，通过一个孔便现出暗环和光环，这个现象必须牢牢记住，因为以后我们还要回过头来讨论这两个不同的图景。这里所描写的实验指出了光的**衍射**，即把小的孔或小的障碍物放在光波行进的路线上时，光的直线传播就发生了偏移（参看书末的附图Ⅱ）。

借助一点儿数学知识，我们还可以大大往前走一步。我们可以求出，要多大或者不如说多小的波长才能产生这样的衍射花样。因此这里所描写的实验，可以使我们能够测量作为光源的单色光的波长。要知道这个数是如何小，我们可以指出太阳光谱中可见光的两个极端的波长，也就是红光与紫光的波长。

红光的波长是0.00008厘米，

紫光的波长是0.00004厘米。

我们不必惊异于这些数字这样小。我们之所以能在自然界中观察到清晰的影的现象，也就是光的直线传播的现象，是因为通常所有的孔和障碍物比光的波长大得多。只有用极小的障碍物与孔，才能显示光的波动的性质。

但是，对光的理论的探索还远远没有结束。19世纪的判决不是终审判决。在现代物理学家看来，要在微粒与波之间下判断的整个问题仍然是存在的，不过现在来判断这个问题要采取一种更深刻、更复杂的形式。在没有看到波动说胜利的可疑点以前，我们暂且承认微粒说的失败。

光波是纵波还是横波

我们在前面考察过的一切光学现象都是支持波动说的。光会弯曲而绕过小的障碍物以及对折射的解释就是支持它的有力论证。如果以机械观作为指导思想，那么还需要回答一个问题，就是怎样来决定以太的力学性质。要解答这个问题，必须先知道以太中的光波是纵波还是横波。换句话说，光是像声一样传播的吗？光波是由于介质密度的变化，而使得粒子向波传播的方向振动的吗？还是以太是一种弹性的胶质物那样的

介质因而只能产生横波，并且它的粒子的运动方向跟波本身传播的方向是垂直的呢？

在解决这个问题之前，我们试着决定哪一个答案比较好些。很明显，若光波是纵波，那真是再好不过了。因为在这个情况下来设计一种力学的以太便简单得多了。以太的图景大概跟解释声波传播的气体的力学图景相似，要构成能传播横波的以太的图景就困难多了。要想象一种胶质物作为一种由粒子组成的介质，由它来传播横波，这不是一件容易的工作。惠更斯相信以太会是“气状”的而不是“胶状”的。但是，自然界毫不理会我们给它的限制。在这件事情上，自然界会宽容物理学家力图用机械观去了解所有的现象吗？要回答这个问题，我们必须讨论几个新的实验。

我们只详细讨论许多实验中的一个，这个实验能够给我们提供一个答案。假设我们有电气石晶体的一片薄片，它是用一种特殊的方式切出来的，切的方法我们不需要在这里描述。晶体的薄片必须薄得使我们可以通过它看见一个光源。现在我们取这样两片薄片，把它们都放在眼睛与光之间。我们会看到什么呢？假如两片都足够薄，便又可以看到一个光点。这样的机会很多，实验符合了我们的期望。我们不必担心这一实验报告可能是出于偶然。让我们假定我们是通过两个晶体片看见这个光点的，现在我们慢慢转动一个晶体片来改变它的位置。但转动时所绕的轴的位置必须是固定不变的，这样上面这句话才有意义。我们以入射光所定出的线为轴。也就是说，我们移动了一个晶体片上所有的点的位置，只有轴上的点的位置不变。一件奇怪的事发生了！光愈来愈弱，最后完全消失。假如继续转动，它又会再出现，而等到回到最初的位置时，又重新恢复最初的景象。

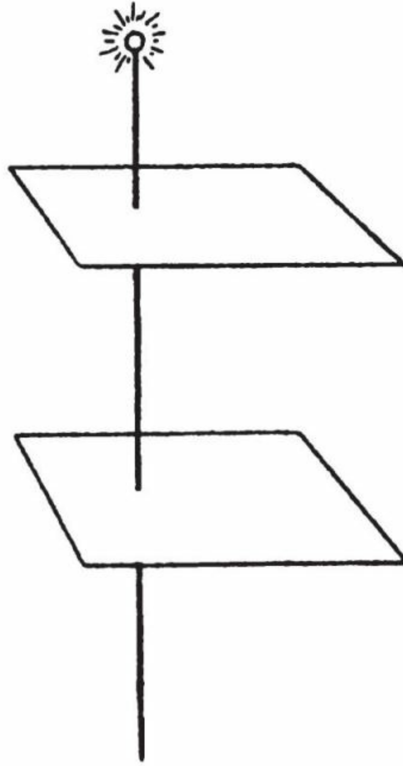


图41

我们无须详细描述这个实验及其他类似的实验就可以提出下面的问题：如果光波是纵波，能够解释这些现象吗？在纵波的情况下，以太的粒子必须和光束一样沿轴运动。如果晶体转动，沿轴线的点并不发生变化。轴上的点没有运动，只有在其附近发生很小的位移。因此对于纵波来说，绝不可能发生光消失和显现的明显变化。这个现象以及诸如此类的现象，只有假定光波不是纵波而是横波才能解释！换句话说，我们必须假定“胶状”的以太。

这是很令人遗憾的，我们如果企图用力学来描述以太，那么必须做面临极大困难的准备。

以太与机械观

为了理解作为传播光的介质的以太的力学性质，人们曾经做过各种各样的努力，如果都要讨论它，就会写成一本很长的历史书。我们知道，力学上的解释是指物质是由粒子组成的，沿着它们之间的连线上有力作用着，而这个力只与距离有关。为了把以太说成一种“胶状”的机械的物质，物理学家必须做一些很牵强、不合理的假定。这里我们不准备把这些假定引出来，因为它们早已过时了，而且差不多已经被人遗忘了。但其结果却是有重要意义的。所有这些假定是那样的不合理，还要引入那么多，而且它们相互之间又毫无关联，这些情况都足以动摇我们对机械观的信念。

把以太说成胶状的物质已经很困难了，但是还有其他更简单的反对它的理由。假如要用力学方法解释光学现象，必须假定以太到处存在。假如光只能在介质中通过，那么便不能有真空的空间。

但是我们通过力学知道，星际空间对物体的运动并没有阻力。例如行星在“以太胶质物”中运动便没有受到任何阻力，但物质介质必然会阻止物体的运动。如果以太不阻碍物质的运动，那么说明以太粒子和物质粒子之间没有任何相互作用。光通过以太，也通过玻璃与水，但在后面两种物质里，它的速度却变了。怎样能够用力学方法解释这些论据呢？很明显，只能假定以太粒子与物质粒子之间有相互作用。我们刚才已经知道，对自由运动的物体来说，必须假定这种相互作用不存在。换句话说，在光学现象中，以太与物质之间有相互作用；而在力学现象中却没有！这显然是一个很自相矛盾的结论。

看来，摆脱这些困难只有一个出路。在20世纪以前的整个科学发展过程中，为了根据机械观去理解自然现象，必须引入许多虚假的物质，例如引入电流体、磁流体、光微粒、以太等。其结果只是把所有的困难集中在主要的几点上，光学现象中的以太即为一例。这里所有想简单地构成以太学说的企图都没有成功，再加上别的反对意见，于是我们觉得，错误的根源似乎在根本假设上，即我们不应该认为可以用机械观解释一切自然现象。科学未能彻底实现机械观的预言，现在已经没有一个

物理学家再相信它有实现的可能了。

在前面对主要的物理观念所做的简单回顾中，我们遇到了一些没有被解决的问题，面临着一些困难与阻碍，使我们不敢再提出一种对描述外在世界的一切现象都能完全一致的观点。在经典力学中，有一个没有人注意到的线索——引力质量与惯性质量相等。电流体和磁流体还有人为的不真实的性质存在。对于电流与磁针之间的相互作用也是一个尚未被解决的困难。我们可以回忆一下，这种力不在连接导线与磁极的直线上作用，而且它跟运动着的带电体的速度有关。表述它的方向与数值的定律极端复杂。最后，还有关于以太的巨大困难。

现代物理学已经解决了所有这些问题。但是在解决这些问题的斗争中，又产生了新的、更深奥的问题。我们的知识比19世纪的物理学家的更广更深了，但是我们的疑惑与困难也比他们更广更深了。

结语

电流体的旧理论以及光的微粒说和波动说都是企图进一步应用机械观的结果。但是在电学和光学领域内，这种应用遇到了极大的困难。

运动着的带电体对磁针的作用力不仅与距离有关，而且与带电体的速度有关。这种力对磁针既不排斥也不吸引，而是垂直地作用在连接针与带电体的直线上的。

在光学中，我们赞成光的波动说，而反对光的微粒说。波在由彼此间有机械力相互作用着的粒子所组成的介质中传播，这显然是一种力学上的概念。但是，传播光的是一种什么介质，它的力学性质又是怎样的呢？在这个问题没有被解答以前，要把光学现象归结为力学现象是没有希望的。但是解决这个问题的困难大得很，以致我们不得不放弃它，因

而也不得不放弃机械观。

3
场、相对论

场的图示法

在19世纪中后期，物理学中引入了新的、革命性的观念，它们打开了一条通往新的哲学观点的道路。这个新的观点与旧的机械观不同。法拉第（Faraday）、麦克斯韦（Maxwell）与赫兹（Hertz）的成就使现代物理学得以发展，使新概念得以诞生，新的“实在”的图景形成了。

现在我们来描写这些新概念如何在科学上引起突然的变化，并阐明它们怎样逐渐地得到澄清和加强。我们将用逻辑推理的程序来叙述它的发展，不一定完全依照年代的先后来叙述。

这些新概念的起源与解释电的现象有关，但是为简便起见，我们不如首先通过力学理论介绍它们。我们知道两个粒子会相互吸引，而它们的吸引力跟距离的平方成反比。我们可以把这一情况用一种新的方法来

表示，但这样做有什么好处一时还很难看出来。图42中的小圆代表一个吸引体，譬如太阳就是一个吸引体。实际上你应该把这个图想象为空间中的一个模型，而不是一个平面图。因此图中的小圆实际上代表在空间中的一个圆球，例如太阳。把一个所谓**检验体**的物体放在太阳的附近，它就会被太阳吸引，而引力发生在连接这两个物体的直线上。因此图上的线表示太阳对于检验体在各个位置上的引力。每根线的箭头表示这个力是朝着太阳的，就是说，这种力是引力。这些线都是**引力场的力线**。目前看来，这不过是一个名词，没有什么理由让我们十分重视它。我们的图中有一个特色，以后将加以发挥。力线是在空间没有任何物质的地方形成的，目前，所有的力线（或简单地说成场）只表示一个检验体放在构成场的圆球附近时会有何种行为。

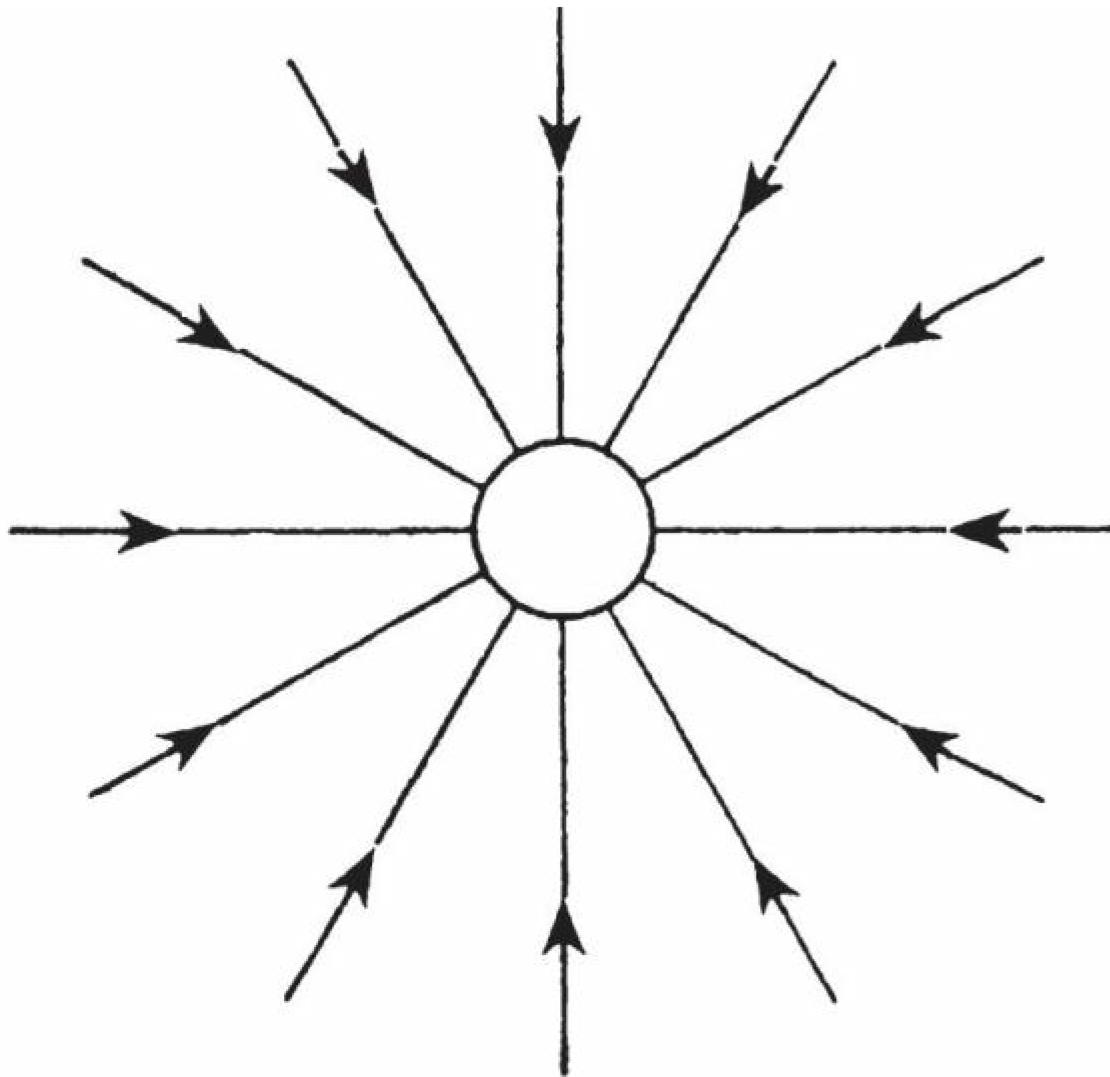


图42

在我们的空间模型中，力线总是跟圆球的表面垂直。因为它们都是由一点发散出去的，因此离圆球最近的地方最密，愈远愈疏。如果我们把离球的距离增加到原来的2倍或3倍，则在我们的立体模型中（并不是在我们的图上）力线的密度会减小为原来的1/4或1/9。因此力线有两个作用，一方面它们表示作用在一个圆球（例如太阳）附近的物体上的力的方向，另一方面空间力线的密度又表示力如何随距离的大小而变化。

场的图，若正确地解释，它表示引力的方向及其与距离的关系。从这样一个图中可以看出引力定律，正如从描写引力作用的文字中，或确

切而简略的数学语言中可以看出引力定律一样。这个**场的图示法**，虽然我们这样称呼它，并且觉得它清楚而有趣，但是我们没有什么理由相信它会表示出任何真实的意义。在引力的例子中，很难看出它有什么用处。这些线不过是图形而已，有人想象确有许多真实的力的作用沿着这些线通过，这样想象自然可以，但是你必须同时想象沿着这些线，作用力的传递速率是无限大的。根据牛顿定律，两物体间的力只与距离有关，与时间毫无关系。力从物体传到另一个物体竟不需要时间！但是，任何理智的人都是不会相信速率无限大的运动的，因此要使这个图起到比模型更大的作用是不会有什么结果的。

我们现在并不准备讨论引力问题，我们介绍这些，只不过为了对电学理论中相似的推理方法做一个简化的解释。

现在来讨论一个实验，这个实验用机械观来解释会有很大的困难。假设电流在一个环形导体中通过，在这个环的中央放上一个磁针。在电流通过的瞬间，产生了一种新的力，这种力作用于磁极上，并且与连接导线和磁极的直线垂直。如果这个力是由一个做圆运动的带电体产生的，则罗兰的实验告诉我们，这个力与带电体的速度有关。这些实验情况与任何力都只在两个粒子的连线上作用而且只与距离有关这一哲学观点相矛盾。

要精确地表示电流作用于磁极上的力是很复杂的，事实上这比表示引力要复杂得多，可是我们也能把这种作用跟引力的作用同样清楚地想象出来。我们的问题是：电流是用怎样一种力作用于放在它附近的磁极上的呢？要用文字来描述这种力是相当困难的，即使用数学公式来表示也一定是复杂而笨拙的。最好是把我们所知道的所有作用力用带有力线的图表示出来，或者更确切地说，用带有力线的空间模型表示出来。但是也有一些困难，因为一个磁极总是跟另一个磁极同时存在，它们共同构成了一个偶极子。不过我们往往把磁针想象得很长，使得只需计及作用于与电流比较靠近的这个磁极上的力。另一极因为离得太远，作用于它的力可以被忽略。为了避免混淆，我们假定靠近导线的磁极是**正的**。

作用于正磁极上的力的性质可以从图43中看出来。

绘在导线旁边的箭头表示电流从较高电势流向较低电势的方向。所有其余的线都表示属于这个电流的力线，这些力线都处在某一平面上。假如图画得恰当，那么这些力线既能表示出电流在给定的正磁极上的作用力的矢量的方向，同时还能表示矢量的长度。我们知道力是一个矢量，要决定它必须知道它的方向和长度。我们主要是讨论作用在磁极上的力的方向问题，这个问题是：怎样从图中找出空间中任何一点的力的方向呢？

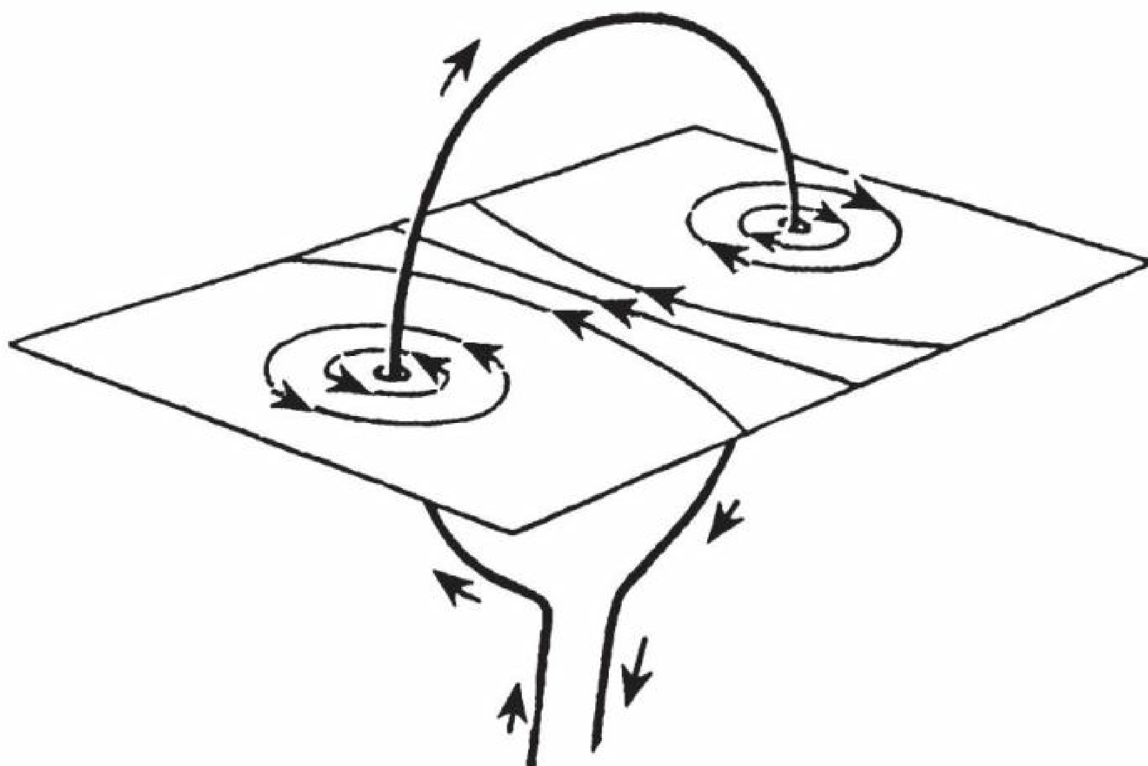


图43

在这样一个模型中，要看出一个力的方向，不会像前面的例子那样简单，因为在前例中，力线是直线。为了方便起见，图44中只画了一根力线。图中指出，力的矢量在力线的切线上，力的矢量的箭头和力线上的箭头所指的方向相同。这样，箭头的方向就是在这一点上作用于磁极上的力的方向，一个好的图，或更确切地说，一个好的模型，也能够把

任何一点上力的矢量长度表示出来。这种矢量在力线稠密的地方，也就是靠近导线的地方较长，而在力线较疏，亦即离导线较远的地方较短。

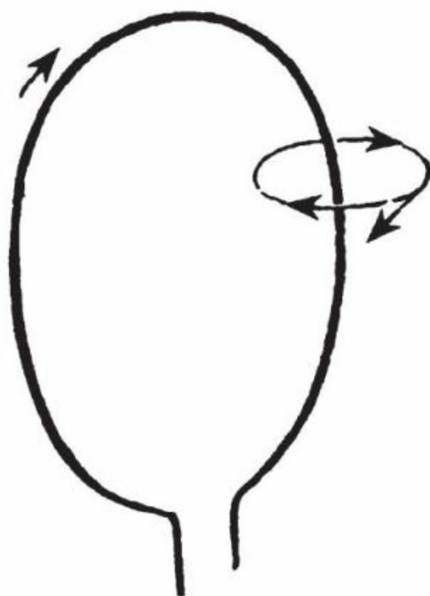


图44

用这种方法，力线或场就使我们能够决定在空间中任何一点作用于磁极的力。以目前来说，这是我们煞费苦心地绘出一个场的唯一论据了。知道了场表示什么，我们就会以更浓厚的兴趣来考察相应于电流的力线。这些线都是围绕着导线的一些圆圈，它们所处的平面跟导线所处的平面相垂直。从图上看到力的特征以后，我们再一次得出这样的结论：力作用的方向垂直于连接导线与磁极间的任何直线，因为圆的切线总是与半径垂直。我们对于作用力的全部知识，都可以被总结在场的构图中。我们把场的概念插入电流与磁极的概念之间，以便用简单的方式把这些作用力表示出来。

任何一个电流都有一个磁场。换句话说，在有电流通过的导线附近的磁极上总是受到一种力的作用。我们不妨顺便提一提，电流的这种性质使我们能够制造出一种灵敏的仪器来探测是否有电流存在。我们一旦知道如何从电流的场的模型来看磁力的特征，就能绘出通电导线周围的场来表示空间任何点上磁力的作用。作为第一个例子，我们来研究一下

所谓的螺线管。它实际上就是一卷金属线，如图45所示。我们的目的就是要用实验来掌握关于与通过螺线管中的电流相关联的磁场的知识，并把知识结合在场的构图中。图45已经把结果显示出来了，弯曲的力线是闭合的，它们围绕着螺线管，表示电流的磁场。

磁棒的磁场，也可以用表示电流的磁场的方法来表示。如图46所示，力线是从正极到负极的。力的矢量总处在力线的切线方向上，而且近极处最大，因为在这些地方力线最密。力的矢量表示磁棒对正磁极的作用。在这种情况中，场的“源”是磁棒而不是电流。

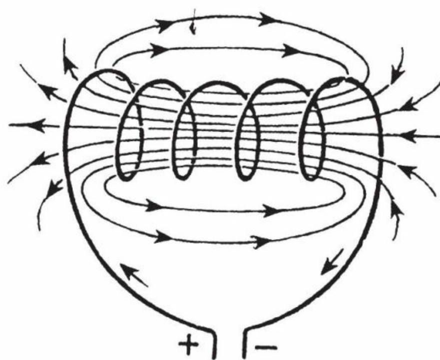


图45

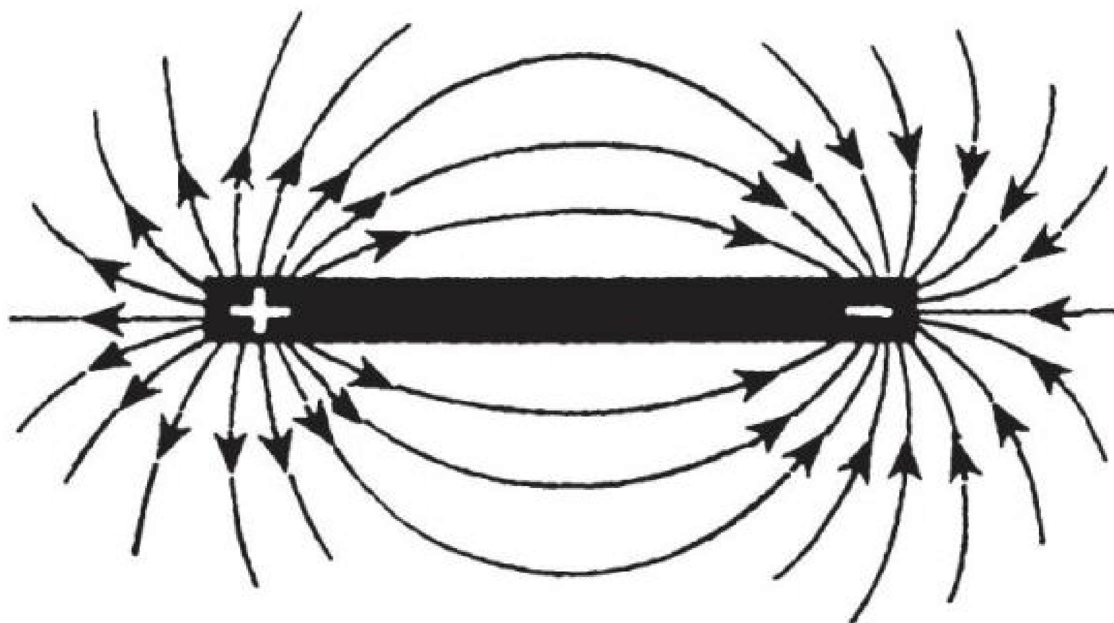


图46

应该仔细地比较一下前面的两张图。图45中的是通过螺线管的电流的磁场，图46中的是磁棒的场。我们且不管是螺线管还是磁棒，而只注意它们外面的两个场。我们立刻会注意到它们的性质是一模一样的，两者的力线都是从螺线管或磁棒的一端伸到另一端。

场的图示法结出了它的第一个果实。如果我们不画出场作为启发，就很难看出通过螺线管的电流和磁棒之间有什么相似之处。

现在，场的概念将经受更严格的考验。我们很快将知道它不仅仅是一种关于作用力的新的图示法。我们可以这样想：暂且假设场唯一地表示由它的源所规定的一切作用。这只是一个猜测。这句话的意思是，假如螺线管的场与磁棒的相同，则它们所有的作用也一定相同。也就是说，两个通电的螺线管的行为会跟两根磁棒的一样；它们相互吸引或排斥，而引力或斥力与距离有关，这完全和两根磁棒所发生的情况一样。这句话还表示一个螺线管和一根磁棒之间也会像两根磁棒一样吸引或排斥。简单地说，通电的螺线管所有的作用和磁棒的相应作用是一样的，因为只有场能起到这些作用，而场在这两种情况里具有相同的性质。实验完全确认了我们的猜测。

如果没有场的概念，要想找出这些论据将是多么困难呀！要把作用于通电的金属线与磁极间的力表示出来是非常复杂的。假如是两个螺线管，便须研究两个电流相互作用的力。但是一旦利用场的概念，我们发现螺线管的场和磁棒的场是相似的，就可以立刻认识所有这些作用的性质了。

我们现在有理由来更加重视场了。对描述现象来说，似乎只有场的性质最为重要。场源不同是无关重要的。场的概念的重要性在于它能够引导我们发现新的实验论据。

场已经被证明是一个很有用处的概念。它起初只是被当作在源与磁针间的某种东西，用来描述两者之间的作用力。它被想象为电流的“经

纪人”，电流的一切作用都靠它来完成。但是现在经纪人还兼任翻译员，它把定律翻译成简单、明确、易懂的语言。

场的描述的最大功绩体现在用它来间接地考察电流、磁棒、带电体的所有作用可能是很方便的，亦即可借助于场做翻译员。我们可以认为场总是跟电流连在一起的某种东西。即使没有一个磁极去检验它是否存在，它也总是在那里。我们还要把这个新的线索加以引申。

带电导体的场可以用描述引力场、电流的场或磁棒的场的同样方法来引述。我们再举一个最简单的例子。要做出一个带正电的圆球的场，我们必须提出这样一个问题：当一个小的带正电的检验体放在作为场源的带电圆球附近，它会受到什么样的力的作用？我们用一个带正电的检验体而不用一个负的，这只是一个惯例，它只是决定力线的箭头应该朝哪一个方向画（图47）。因为库仑定律与牛顿定律相似，所以这个模型跟前面引力场的模型（图42）也相似。两个模型的唯一不同之处便是箭头的方向相反。两个物体的正电荷相互排斥，而两个物体的质量相互吸引。可是一个带负电的圆球的场会跟引力场相同（图48），因为小的带正电的检验体会受场源的吸引。

假使电极与磁极都处于静止状态，那么它们之间不会有任何相互作用：既没有吸引，也没有排斥。若用场的语言来表达这个情况，我们可以说：一个静电的场对一个静磁的场没有影响，反过来说也一样。“静场”是指不依时间而变化的场。假如没有外力的干扰，磁棒与带电体可以放在一处而永不发生作用。静电场、静磁场和引力场的性质各不相同。它们不会互相混合；不论有无其他的场存在，它们都各自保持自己的个性。

现在我们回到带电圆球上来，它原来一直处于静止状态，现在假定它由于某种外力的作用开始运动。带电圆球运动了。这句话用场的语言

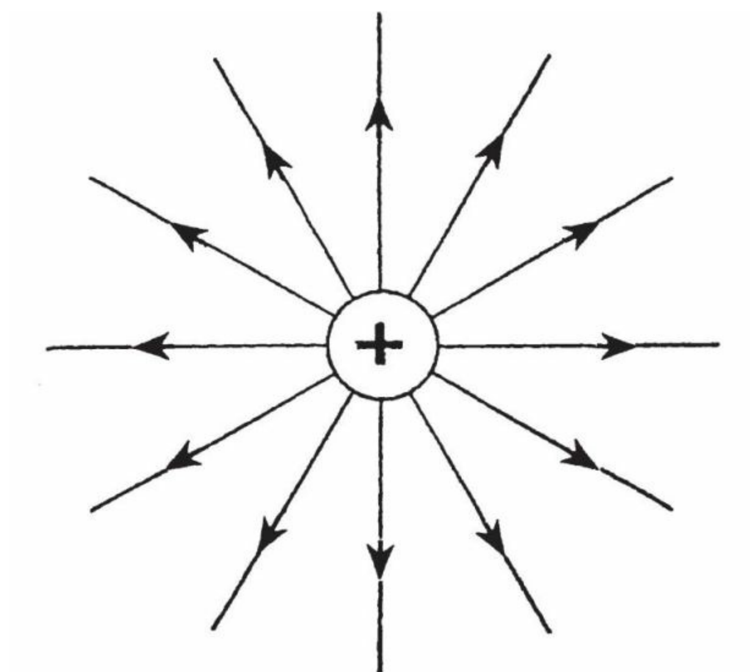


图47

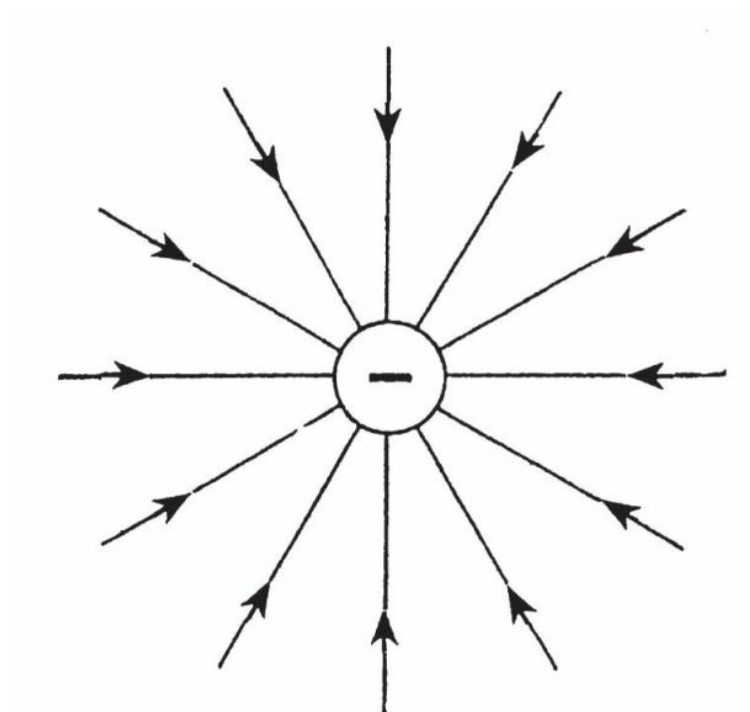
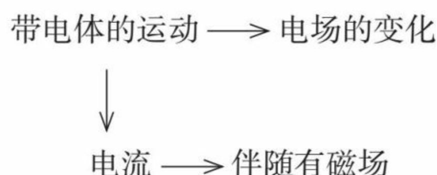


图48

现在我们回到带电圆球上来，它原来一直处于静止状态，现在假定它由于某种外力的作用开始运动。带电圆球运动了。这句话用场的语言

来说便是：带电体的场随时间而变化。但是根据罗兰的实验，我们知道带电的圆球的运动相当于电流。而每一电流必有一磁场相伴存在。因此，我们论证的程序便是：



因此我们断定：**由带电体的运动而产生的一个电场的变化，永远由一个磁场相伴。**

我们的结论是根据奥斯特的实验得出来的，但是这个结论所包含的意义还不止这些。我们认识到随时间而变化的一个电场联合着一个磁场，这对于我们做进一步的论证非常重要。

带电体在静止的时候只有静电场。而带电体一旦运动，磁场就出现了。我们还可以进一步说，假使带电体更大，或运动得更快，则由带电体运动所产生的磁场也更强。这也是罗兰实验的一个结果。用场的语言来说：电场变化愈快，相伴的磁场便愈强。

电流体的学说是依照机械观建立起来的，这里我们已把熟知的论据由电流体的语言译成场的新语言了。我们在后面会看到，我们这种新语言是多么清晰、多么有用。

场论的两大台柱

“一个电场的变化永远由一个磁场相伴。”假使我们把“电”与“磁”两个字互换一下，这句话便变成：“一个磁场的变化永远由一个电场相伴。”这种说法是否正确，只有实验才能决定。但是，这是由于使用了场的语言，因此才形成了提出这个问题的观念。

在100多年以前，法拉第做了一个实验，这个实验导致了感生电流的伟大发现。

这个现象的演示是很简单的（图49）。只需要一个螺线管或其他电路、一根磁棒以及一种检验电流存在与否的仪器。开始时，在构成一个闭合电路的螺线管附近有一个静止的磁棒。因为不存在电源，导线中没有电流通过。这里只有不随时间而变化的一个磁棒的静磁场。现在我们很快地改变磁棒的位置，或者移开些，或者挨近些。在这个时刻，在导线内立刻就有电流出现，随即又消失了。每当磁棒的位置改变一下，电流就会重新出现；而这种电流可以用相当灵敏的仪器检验出来。但是根据场论的观点，一个电流表示有一个电场的存在，这个电场迫使电流体在导线中流动。当磁棒再静止时，电流便消失了，电场也同样消失了。

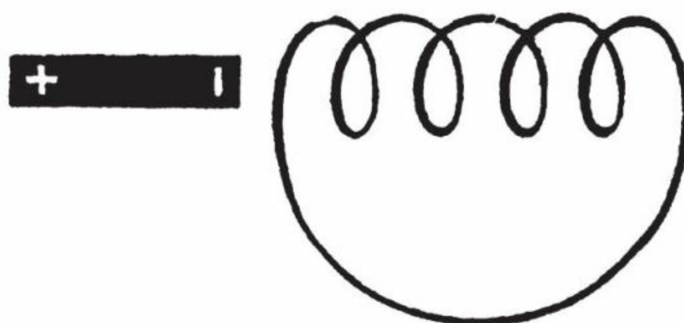


图49

设想我们目前还不知道场的语言，而要用机械观的概念定性地和定量地来描述这些实验结果。我们的实验将被这样表述：一个磁偶极子的运动产生了一种新的力，这种力使导线中的电流体流动。于是又产生了这样一个问题：这种力与什么有关？这是很难回答的。我们必须研究这种力与磁棒的速度的关系、与它的形状的关系以及与线圈的形状的关系。而且，如果用旧的语言来解释的话，这个实验不能告诉我们是不是用另一个通电电路的运动来代替磁棒的运动，也能产生感生电流。

假使我们用场的语言，并且相信作用是由场决定的，那么结果就完全不同了。我们立刻可以看到通电的螺线管会起到磁棒一样的作用。图

50上画出了两个螺线管：一个较小，其中有电流通过；另一个较大，其中有感生电流可以检验出来。我们可以像前面移动磁棒一样移动小的螺线管，结果在较大的螺线管中便会产生感生电流。此外，我们可以不用移动小的螺线管的方法而用产生和撤去电流，也就是用接上和断开电路的方法来激起和撤去磁场。我们又一次看到，场论所提出的新论据又被实验确认了！

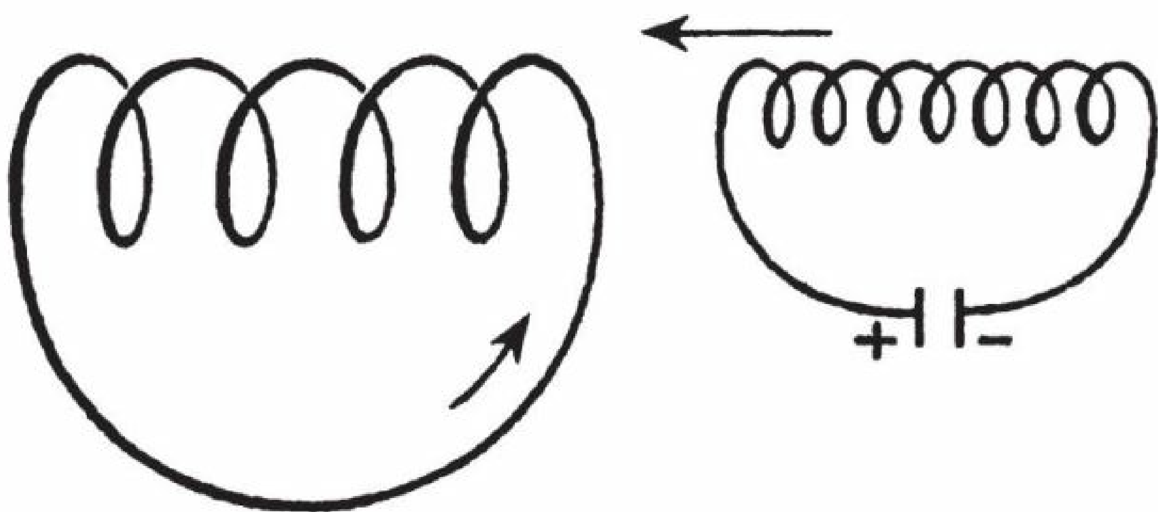


图50

我们来举一个比较简单的例子。我们用一个没有任何电源的闭合导线，在它的附近有一个磁场。至于磁场的源是另一个通电的电路还是一根磁棒，这是无关紧要的。图51中画着闭合电路和磁力线。用场的术语来对感应现象做定性和定量的描述是很简单的。如图所示，有些力线通过线圈所围成的圆。我们必须考察通过线圈所围住的那部分平面的力线。不论场有多强，只要场不变，便不会产生电流。但是一旦通过闭合电路所围住的圆的力线的数目有所变化，那么它上面就立刻引起电流。电流是由通过这个面的力线数目的变化决定的，而电流也可以引起力线数目的变化。这个力线数目的变化不论对感生电流做定性的或定量的描述都是唯一重要的概念。“力线数目变化”是指力线分布密度在变化，而我们记得，这句话的意思就是场的强度在变化。

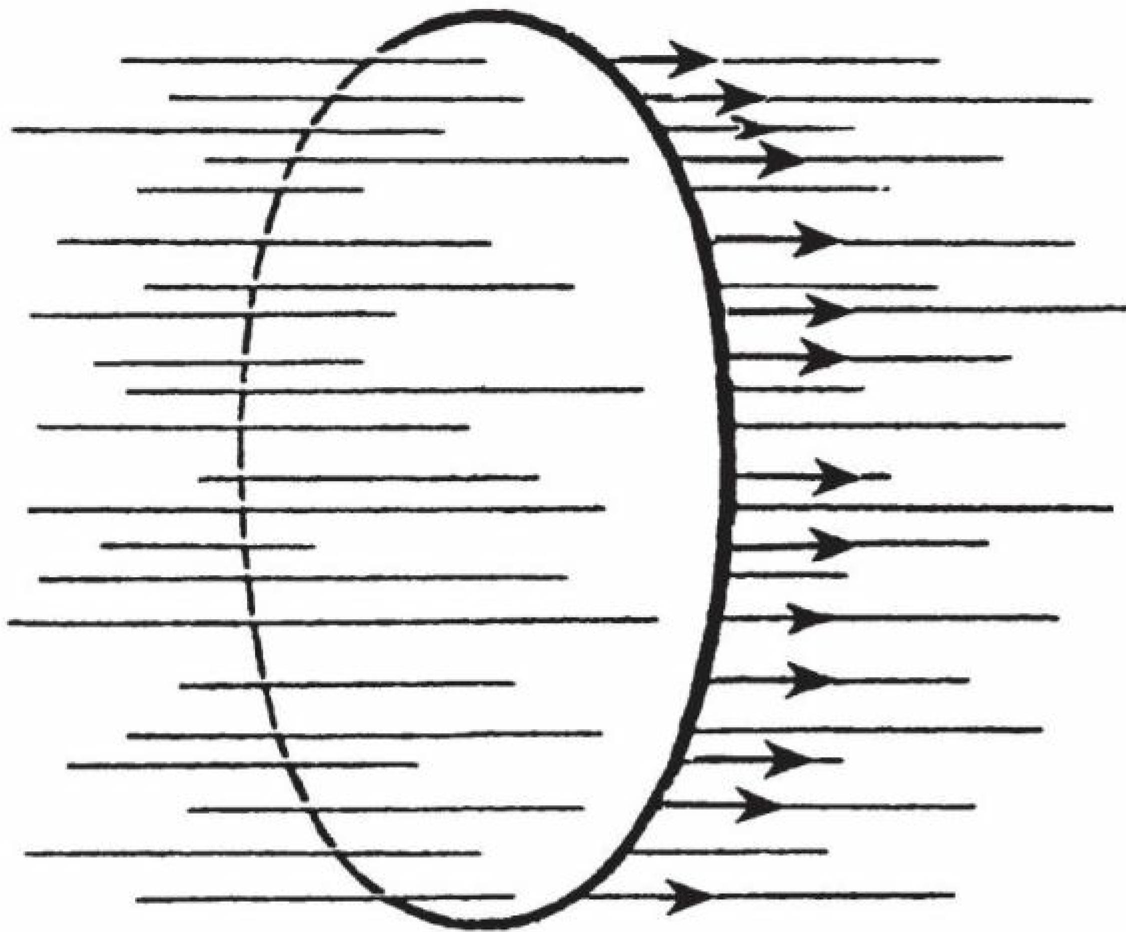


图51

在我们的推理程序中，最重要的几点是：磁场的变化→感生电流→带电体的运动→电场的存在。

因此，**一个在变化着的磁场总是伴随着一个电场**。

于是我们找到了支持电场和磁场理论的两个最重要的台柱。第一个是变化着的电场跟磁场相结合。它是从奥斯特的关于磁针发生偏转的实验上形成的，并且得出了这样的结论：**变化着的电场总是伴随着磁场**。

第二个是把变化着的磁场跟感生电流结合起来，它是从法拉第的实验中形成的。两者便成为定量描述的根据。

伴随着变化的磁场的电场也似乎是真实的。我们在前面已经设想

过，即使没有检验磁极的话，电流的磁场还是存在的。同样，我们可以认为即使没有闭合的导线来检验有没有感生电流，电场还是存在的。

事实上，这两个台柱可以化成一个，就是说，化成以奥斯特实验为根据的那个。法拉第的实验结果可以根据能量守恒定律从奥斯特实验推论出来。我们采用两个台柱的说法，只是为了明白与省事。

我们再来讲一个描述场的结果。假设有一个通有电流的电路，电流的源是伏打电池。如果将导线与电源之间的连接突然断开，当然不会再有电流了！但是在电流断绝的这一刹那，却发生了一种复杂的过程，这种过程只有用场论才能预言。在电流断绝之前，导线周围存在着磁场。电流断绝了以后，这个磁场便不存在了。因此是由于电流的断绝，磁场才消失。这样通过导线所包围的面的磁力线的数目变化得很快。但是不管这种迅速的变化是怎样产生的，它一定会产生感生电流。更有意义的是，激起感生电流的磁场的变化愈大，感生电流愈强。这个结果又是对场论的另一个考验。电流的突然断绝一定伴随着产生强烈而短暂的感生电流的现象。实验又确认了这个理论的预言。任何人把电流弄断都会注意到有一个火花产生。这个火花正显示由于磁场的迅速变化而产生的很强的电势差。

这个过程也可以从另一观点，即从能的观点去看。磁场一消失，却产生了火花。这个火花代表能，因而磁场也一定代表能。为了一致地应用场的概念和它的语言，我们必须将磁场当作能的贮存所。只有这样才能使我们按照能量守恒定律来描写磁的和电的现象。

最初，场不过是一个颇有用处的模型而已，但是却愈来愈真实，它帮助我们了解旧的论据并且引导我们认识新的论据。把能归结到场是物理学发展中向前迈进的一大步，场的概念显得愈来愈重要，而机械观中最重要的物质的概念则愈来愈遭到抑制了。

场的实在性

关于场的定律的定量的数学描述都总括在所谓麦克斯韦方程中。上面所说的论据促成了这些方程的建立，但是方程中所包括的内容比我们所能指出的要丰富得多。在它们的简单的形式下隐藏着深奥的内容，这些内容只有靠仔细的研究才能显示出来。

这些方程的提出是牛顿时代以来物理学上一个最重要的事件，这不仅是因为它的内容丰富，并且还因为它构成了一种新型定律的典范。

麦克斯韦方程的特色显现在现代物理学的所有其他方程式中，这种特色可以用一句话来概括，即麦克斯韦方程是表示场的**结构**的定律。

麦克斯韦方程何以在形式上和性质上都跟经典力学中的方程不同呢？我们说这些方程在描述场的结构，这究竟是什么意思呢？我们怎样才能够从奥斯特和法拉第的实验中构成一个新型的定律，这个定律在物理学的后续发展中又重要到什么样的程度呢？

从奥斯特的实验中，我们已经看到磁场环绕着变化的电场闭合起来。从法拉第的实验中，我们又看到电场环绕着变化的磁场闭合起来。为了概括地描述麦克斯韦理论的某些特色，我们暂且集中注意力于这两个实验中的一个，譬如法拉第的实验。现在再把图51复习一下。我们已经知道，如果穿过导线包围的面的力线的数目发生变化，便会产生感生电流。因此当磁场变化、电路变形或电路移动，都会有电流产生，就是说：不论穿过表面的磁力线的数目是因为什么缘故变化的，只要有了这种变化，便会有电流。要把这种种可能性都计算在内来研究它们的特殊影响，那么必定会引出一种极为复杂的理论来。但是，我们能不能把这个问题简化呢？我们试着把牵涉电路的形状、长度以及导线所围成的面等因素都不予考虑。我们可以想象图51中所画的线圈逐渐缩小，最后变成一个极小的线圈，只包围空间的某一点。这样，关于形状和大小的问题就完全没有关系了。在闭合曲线缩成一点的极限情况下，线圈的大小

和形状就自然而然地从我们的考虑中消失，于是我们就得到把任何时刻及空间中任何一点的磁场和电场的变化联结起来的定律。

这是得出麦克斯韦方程的主要步骤中的一步。这又是在想象中把法拉第实验中的线圈缩成一点所做的一个理想实验。

事实上，我们应该叫它半步而不是一整步，因为到目前为止，我们的注意力一直集中在法拉第的实验上。但是以奥斯特的实验为根据的场论的另一个台柱也必须用同样的方式很细致地加以研究。在这个实验中，磁力线围绕着电流的周围闭合起来。把磁力线的圈缩成一点以后，其余的半步就完成了。而这整个一步便得出在空间中任何一点以及任何时刻的磁场和电场的变化之间的联系。

但是还需要有另一个很重要的步骤。根据法拉第的实验，必须有导线来检验电场是否存在，正如在奥斯特的实验中必须有磁极或磁针来检验磁场是否存在一样。但是麦克斯韦的新的理论观念超越了这些实验论据。在麦克斯韦的理论中，电场和磁场，或简单些说，**电磁场**，是一种实在的东西。一个变化的磁场总产生电场，而不管有没有一根导线去检验它是否存在；一个变化的电场也总产生磁场，不管有没有一个磁极去检验它是否存在。

因此，要有两个重要的步骤促成麦克斯韦方程的成立。第一，必须使奥斯特和罗兰的实验中围绕电流及变化的电场周围的磁场的闭合力线缩成一点，必须使法拉第的实验中围绕变化的磁场周围的电场的闭合力线缩成一点。第二，把场看成实在的东西；一旦产生了电磁场，必须按照麦克斯韦定律而存在、作用和变化。

麦克斯韦方程是描述电磁场的结构的。这些定律的描述对象是整个空间，不像力学定律那样，只以物体或带电体所在的一些点为描述的对象。

我们记得在力学中只要知道一个粒子在某一时刻的位置和速度，又知道作用于它的力，便可以预知这个粒子的未来的经行路程。在麦克斯

韦的理论中，假如知道了场在某一时刻的情况，便可以根据这个理论的方程推出整个场在空间和时间中会怎样变化。麦克斯韦方程使我们能够了解场的来历，正如力学方程能使我们了解物质粒子的来历一样。

但是力学定律和麦克斯韦定律仍然有一个重要的不同点。把牛顿的引力定律和麦克斯韦的场的定律做比较，便更能显出这些方程所表达的一些特色来。

利用牛顿定律，我们可以从作用于太阳和地球之间的力推导出地球的运动。这个定律使地球的运动跟远离地球的太阳的作用联系在一起了。地球和太阳虽然相隔很远，但在力的表演中，它们都是演员。

在麦克斯韦的理论中，根本没有这种具体的演员。这个理论的数学方程表达了电磁场的定律。它们不像牛顿定律中那样联系两个相隔很远的事件，也不是把**此处**所发生的事情跟**彼处**的条件联系起来。**此处的**与**现在的**场只与**最邻近的**以及**刚过去的**场发生关系。假使我们知道此处和现在所发生的事件，这些方程便可以帮助我们预言在空间上稍为远一些，在时间上稍为迟一些会发生什么。它们能使我们用一些小步骤来增加场的知识。把这些小步骤加起来，我们便可以由远处所发生的事件推出此处所发生的事件。牛顿的理论恰恰相反，它只允许把距离很远的事件联系起来的大步骤。奥斯特和法拉第的实验都可以从麦克斯韦的理论中推导出来，但是只能用把一些小步骤总加起来的办法，而每一个小步骤都是由麦克斯韦方程确定的。

如果从数学上更全面地对麦克斯韦方程加以研究，就能推导出一些新的实际上是出乎意料的结论，而使整个理论在一个更高的水平上受到考验，因为这些理论上的结果，现在已具有定量的性质，而且是由一系列逻辑推理得出来的。

我们再来设想一个理想实验。用某种外部影响迫使一个带有电荷的小圆球很快地而且有韵律地像钟摆一样振荡起来。根据我们已经具备的关于场的变化的知识，我们怎样用场的语言来描写这里所讨论的一切事情呢？

带电体的振荡产生了一个变化的电场。它总是伴随着一个变化的磁场。假如把一个形成闭合电路的导线放在附近，于是与变化的磁场相伴而发生的便是电路中的电流。这些话无非是复述已知的论据，但是研究麦克斯韦方程以后，对振荡带电体的问题便会有更深的了解。根据麦克斯韦方程所做的数学推理，我们便可以发现围绕在一个振荡带电体周围的场的性质、它在场源近处和远处的结构以及它随时间的变化。这种推理的结果就是**电磁波**。能是从振动的带电体中以一定的速率经过空间而辐射出去的；能的转移、状态的运动，是一切波动现象的特性。

我们已经研究过几种不同的波。其中有由圆球的脉动所产生的纵波，它的密度的变化由介质传播。还有一种胶状的介质，横波就是在这种介质中传播的，由于圆球的转动而引起球面上的胶状物的形变，这种形变在介质中向外传播。但是现在在电磁波的例子中，传播的是哪一类变化呢？这正是一个电磁场的变化。电场的每一次变化都产生磁场，这个磁场的每一次变化又产生电场，就这样一次一次地反复变化下去。因为场代表能，所以所有这些在空间中以一定速度传播的变化就形成一个波。从理论可以推导出，这些磁力线与电力线都处在与传播方向垂直的平面上。因此所形成的波是横波。我们从奥斯特和法拉第的实验中所构成的场的图景的原来面貌仍然保留不变，但是我们现在看到它有一种更深远的意义了。

电磁波是在空间传播的。这又是麦克斯韦理论的一个结果。假使振动着的带电体突然停止运动，它的场便变成静电场了。但是由带电体振动所产生的一系列波还是继续在传播。这些波独立地存在着，而我们可以像了解任何其他具体事物的过程一样来研究它们变化的过程。

由于麦克斯韦方程是描述电磁场在空间中任何一点在任何时刻的结构的，这个在空间中以一定速度传播，并随着时间而变化的电磁波的图景就可以从麦克斯韦方程推导出来。

还有另外一个非常重要的问题。电磁波在空中是以多大的速率传播的呢？麦克斯韦的理论，在一些不以波的真正传播为对象的简单实验中

的数据的支持下，做了一个明确的回答：**电磁波的速度等于光速**。

奥斯特和法拉第的实验是建立麦克斯韦定律的根据。到目前为止，我们所有的成果都来自对这些用场的语言来表述的定律的仔细研究。从理论上发现以光速传播的电磁波，这是科学史上最伟大的成就之一。

实验确认了理论的预言。50年前，赫兹第一次证明了电磁波的存在，而且用实验证明了它的速度等于光速。今天，千千万万人都已经知道电磁波的发送和接收。他们所用的仪器已经比赫兹所用的要复杂得多，这些仪器甚至能在离波源几千英里处发现波的存在，而当时赫兹的仪器只能在几码[注]以外发现它。

场与以太

电磁波是横波，是以光速在空中传播的。光与电磁波速度相等，这暗示着光的现象与电磁现象之间有很密切的关系。

当我们必须在微粒说与波动说之间做出选择时，我们决定赞成波动说。光的衍射现象是影响我们这一决定的最有力的论据。但是，如果我们假定光波是一种电磁波，这个假定对于任何光学上的论据的解释都不会产生冲突，相反地还可以得出别的结论来。假如真是这样，那么物质的光学性质和电学性质之间应该有某种联系，而这种联系应该可以从麦克斯韦的理论推导出来。事实上，我们确实可以推导出这样的结论，而且这些结论经得起实验的考验，这就是我们赞成光的电磁说的很重要的论据。

这个巨大的成果应归功于场论。表面上毫无关系的两个科学分支已经被同一个理论统一起来了。同一个麦克斯韦方程既可以解释电磁感应现象，也可以解释光的折射现象。如果我们的目的是用一个理论来解释

已发生的或将会发生的一切现象，那么，毫无疑问，光学与电学的结合便是向这方面前进的一大步。从物理学的观点看来，普通的电磁波与光波的唯一区别是波长；光波的波长较短，用肉眼就可以探测出来，普通的电磁波的波长较长，须用无线电接收机才能探测出来。

旧的机械观总想把一切自然现象归结为作用于物质粒子之间的力。电流体的理论就是建立在这个基础上的第一种朴素的理论。19世纪初期的物理学家认为场是不存在的。在他看来，只有物质和它的变化才是实在的。他只想利用直接关联到两个带电体的概念来解释两个带电体间的作用。

最初，场的概念不过是作为我们便于从力学的观点去理解现象的一种工具。新的场的语言不是对带电体本身而是对带电体间的场的描述；场的描述对了解带电体的作用是很重要的。对于这种新概念的认识是逐渐加深的，到后来，场竟把物质也掩蔽起来了。于是大家觉得在物理学中发生了某种非常重要的事件。一种新的实在产生了，一种在机械观中没有地位的新概念产生了。场的概念经过一番奋斗，逐渐在物理学中取得了领导地位，而至今还是基本的物理概念之一。在一个现代的物理学家看来，电磁场和他所坐的椅子一样真实。

但是，如果认为新的场论已使科学从旧的电流体理论的错误中解脱出来，或者说新理论毁灭了旧理论的成就，是不公正的。新理论既指出了旧理论的优点，也指出了它的局限性，而且使我们能在更高理论水平上重新得到自己的旧概念。不仅电流体及场的理论如此，任何物理学说的变化，无论看起来具有怎样的革命性，都是如此。例如，在目前情况下，我们仍然可以在麦克斯韦的理论中找到带电体的概念，不过这里只把带电体看作电场的源而已。库仑定律仍然是有效的，而且仍然包含在麦克斯韦方程中，从这些方程式中可以推导出库仑定律，成为许多推论结果之一。我们还可以应用旧的理论，只要我们所考察的论据是在这个理论的有效范围之内。但是我们也可以应用新理论，因为一切已知的论据都已经包含在新理论的有效范围之内了。

若用一个比喻，我们可以说建立一种新理论不是像毁掉一个旧的仓库，在那里建起一座摩天大楼。它倒是像在爬山一样，愈是往上爬愈能得到新的更宽广的视野，并且愈能显示出我们的出发点与其周围广大地域之间的出乎意料的联系。但是我们出发的地点还是在那里，还是可以看得见，不过显现得更小了，只成为我们克服种种阻碍后爬上山巅所得到的广大视野中的一个极小的部分而已。

事实上，经过很久大家才认识到麦克斯韦理论的全部内容。最初大家都以为场最后总可以借助于以太用力学方法来解释。现在我们知道，这种预言不可能被实现，场论的功绩实在太显著、太重要了，因为它换下了一个力学的教条。在另一方面，替以太设想一个力学模型的问题愈来愈没有意义了，只要看看那些假设的牵强和虚假的性质，便愈来愈令人沮丧。

现在唯一的出路，便是认定空间具有一种发送电磁波的物理性能，而不过分顾虑这句话有何真正意义。我们仍然可以用以太这个词，但它只表示空间的一些物理性质。以太这个词的含义在科学的发展过程中已经改变了很多次。目前它已不再是一种由微粒组成的介质了。它的故事绝对没有结束，还要用相对论继续讲下去。

力学的框架

在我们的故事说到这个阶段时，必须回溯到开始的地方——伽利略的惯性定律。我们再引用一次：

> 任何物体，只要没有外力改变它的状态，便会永远保持静止或匀速直线运动的状态。

一旦了解惯性的观念，似乎对于这个问题已经没有什么可说的了。虽然我们已经全面地讨论过这个问题，但是没有把它讨论彻底。

设想有一个很严格的科学家，他相信惯性定律可以用实际的实验加以证明或推翻。他在水平的桌面上推动小的圆球，并设法尽量消除摩擦。他注意到桌面与圆球愈加平滑，运动便愈加均匀。当他正要宣布惯性原理时，有人突然跟他开玩笑。这个物理学家是在一个没有窗户的房间里工作，并且与外界完全隔绝。开玩笑的人装置一种机械，可以使整个房间绕一根穿过它的中心的轴而旋转。旋转一开始，这个物理学家立刻得到新的、出乎意料的经验。原来是匀速直线地运动的圆球，现在尽量离开房间的中央而靠近房间的墙壁。他自己感到有一种奇怪的力把他推向墙去。他所体验到的感觉和在一个转急弯的火车或汽车中的人所感到的相似，和坐在旋转木马上所感到的更相似。他过去所得到的一切成果现在都被粉碎了。

这个物理学家若要放弃惯性定律，必须同时放弃所有的力学定律。惯性定律是他的出发点；假如这个出发点改变了，那么他的一切结论也都改变了。如果一个观察者毕生都是在一个转动的房间内度过的，并且在它里面进行各种实验，那么他所得到的物理学定律跟我们的是不同的。另一方面，如果他在进入房间以前对于物理学的原理已经有了很深的知识和坚定的信念，那么他就解释力学定律之所以被推翻，是因为房间在转动。用力学的实验，他甚至能测定它是怎样转动的。

我们为什么对这个旋转的房间内的观察者产生这么大的兴趣呢？道理很简单，因为在某种程度上，我们在地球上也是处于同样的地位。从哥白尼时代以来，我们便知道地球是绕着它自己的轴旋转并环绕着太阳运行的。在科学发展中，甚至这个任何人都很清楚的简单观念也不会不受触动。但是我们暂且抛开这个问题，接受哥白尼的观点。假使那个旋转着的观察者不能确认力学定律，那我们在地球上自然也不能确认它。但是地球转动得较慢，所以转动的影响不明显。可是有许多实验都证明跟力学定律有些偏差，这些实验的一致性可以被看作地球转动的证明。

可惜我们不能置身于太阳与地球之间，在那里去证明惯性定律的绝对有效性以及观察一下转动着的地球。这只有在想象中才做得到。我们所有的实验都只能在我们所居住的地球上进行。这句话常常被我们更科学地说成：**我们的坐标系是地球**。

我们不妨举一个简单的例子，把这句话的意思说得更清楚些。我们能够预言一个从塔上掷下来的石子在任何时刻的位置，并用观察来确认我们的预言。假使把一根量杆放在塔边，我们便可以预言在某个时候，落体会与杆上的一个数码相合。不言而喻，塔和量杆都不是用橡皮或其他在做实验时会发生变化的物质制成的。事实上，一根严密地跟地球相联系的刻度不变的尺和一只好的钟，这就是做实验时我们所需要的一切。我们只要有这两样东西，不仅可以不管塔的建筑怎样，甚至有没有塔都可以不管。上面所说的种种假定都是很平凡的，在描写这些实验时通常不会被提到。但是这个分析表明，在我们的每一句话后面都隐藏有许多假定。在这个例子中，我们假定有一根坚硬的量杆和一只理想的钟，若没有这两样东西，我们就不能检验伽利略的落体定律是否有效。用这样简单而重要的实际器具——一根量杆和一只钟，我们就能够以一定程度的准确性确认这个力学定律。如果这个实验做得非常仔细，它便会发现理论和实验之间有些不符，这种不符是由于地球的转动而产生的，或者换句话说，这是由于这里所表述的力学定律，在严密地跟地球相联系的坐标系中不是十分有效的。

在所有的力学实验中，不论是哪一种形式的实验，我们必须决定质点在某一确定时刻的位置，正如在上述实验中决定落体的位置一样。但是位置总是对于某种物件来说的，例如在上述的实验中，落体的位置是对于塔与刻度尺来说的。我们必须有一些所谓**参考系**，这是用来决定物体的位置的力学框架。例如在城市中，要决定物和人的位置，大街和小巷就是我们参考的框架。到目前为止，我们引用力学定律时都没有想过要说明所参考的框架，因为我们住在地球上，而在任何情况中都不难选择一个与地球严密地相联系的参考框架。我们把所有的观察都关联到它上面的这个参考框架是由坚硬不变的物体构成的，这个框架被称为**坐标**

系。

我们所有的物理描述都还缺少某些东西。我们没有注意到任何观察都必须在一定的坐标系中进行。我们不去描写这个坐标系的结构，反而根本忽视它的存在。例如，过去我们写“一个物体匀速地在运动……”，其实我们应该这样写：“一个物体对某一选定的坐标系匀速地在运动……”那个关于旋转的房间的经验告诉我们，力学实验的结果可能跟我们所选定的坐标系有关。

假如两个坐标系相对转动，那么力学定律不能在两者之中都有效。如果把一个游泳池作为这两个坐标系中的一个，它的水面是平的，那么在另一个坐标系中，同样的游泳池里的水面就会是弯曲的，正如任何人用茶匙搅动杯中的咖啡那样。

在前面叙述力学的主要线索时，我们忽略了很重要的一点。我们没有说出它们在哪一种坐标系中是有效的。因此，全部经典力学就等于悬在半空中，因为我们不知道它属于哪一个坐标系。然而，让我们暂且不去管这个困难。我们来做一个不十分准确的假定，就是说认为在所有与地球严密地相联系的坐标系中，经典力学的定律都有效。这样做是为了把坐标系确定下来，使我们叙述起来可以明白一些。虽然我们说地球是一个适宜的参考坐标这句话并不十分正确，但我们暂且这样承认它。

因此，我们假定有一个坐标系；在这个坐标系中，力学定律是有效的。这样的坐标系只有一个吗？我们假设有一个像一列火车、一艘船、一架飞机那样的坐标系，它相对于地球在运动。在这些新的坐标系中，力学定律都有效吗？我们确实知道它们不是一直有效的，例如火车在转弯时，船在风暴中颠簸时，飞机在翻身时，它们就不再有效了。我们先说一个简单的例子。如果有一个坐标系匀速地相对于一个“好的”坐标系在运动，所谓一个“好的”坐标系就是力学定律在其中有效的坐标系。例如，沿着直线以不变的速率在行驶的一列理想火车或一艘航行得异常平稳的船。我们从日常的经验中得知这两个坐标系都是“好的”，因为在匀速直线地运动着的火车或轮船中所进行的物理实验和在地面上所做的结

果完全一样。但是假如火车突然停止了，或急剧地加快了，或者海面突然起了风浪，便会发生异常的情况。在火车里，箱子从行李架上掉下来了；在船上，桌子和椅子翻倒了，乘客也晕船了。从物理学的观点看来，这只表示力学定律不能在这些坐标系中被应用，它们是“坏的”坐标系。

这种结果可以用所谓伽利略相对性原理来表达：**假使力学定律在一个坐标系中是有效的，那么在任何其他相对于这个坐标系做匀速直线运动的坐标系中也是有效的**。

假使有两个坐标系，相互做不等速运动，则力学定律不会在两者之中都是有效的。“好的”坐标系就是力学定律在其中有效的坐标系，被称为**惯性系**。究竟是否存在一个惯性系的问题，直到现在还无法确定。但是如果有一个这样的系统，便会有无数个这样的系统。凡是对第一个惯性系做匀速直线运动的坐标系都是惯性坐标系。

我们来研究这样一个例子：有两个坐标系从已知的某一点出发，而且以已知速度相对做匀速直线运动。假如有人喜欢做具体的构思，他可以想到一艘船或是一列火车相对于地面在运动。力学定律可以在地面上，也可以在与它做匀速直线运动的火车内或船上以同样精确度的实验加以确认。但是假如两个系统的观察者从他们各自不同系统的观点对同一事件进行观察而开始讨论时，便会产生某些困难。每一个人都想把别人的观察翻译成为自己的语言。再举一个简单的例子：从两个坐标系（一为地球，一为做匀速直线运动的一列火车）观察同一个质点的运动。这两个坐标系都是惯性的。如果两个坐标系在某个时刻的相对速度与相对位置都是已知的，那么是否知道一个坐标系中的观察结果，便可以求出另一个坐标系中的观察结果呢？要描述自然现象，我们必须知道从一个坐标系过渡到另一个坐标系的方法，这是非常重要的，因为这两个坐标系是等效的，所以同样适宜于描写自然界中的现象。事实上，只要知道在一个坐标系中的一个观察者所得到的结果，便可以知道在另一个坐标系中的观察者所得到的结果。

我们现在不用船或火车，而更抽象地来考虑这个问题。为简便起见，我们只研究直线运动。有一根坚硬的刻有标度的杆和一只好的钟。在简单的直线运动的情形中，这根坚硬的杆代表一个坐标系，正如伽利略的实验中的塔上的标度尺一样。在直线运动的情形中，把一个坐标系想象为一根坚硬的杆，在空间中的任意运动的情形中，把一个坐标系想象为一个由相互平行和相互垂直的杆构成的坚硬的框架，而不管什么塔、墙、街道以及其他这一类的东西总是比较简单些、好些。假设在这里的最简单的情形中，有两个坐标系，就是说，有两根坚硬的杆；假定一根杆放在另一根杆上面，我们分别称它们为“上面的”和“下面的”坐标系。我们假定这两个坐标系以一定的速度相对运动，一根杆沿着另一根滑动。为妥当起见，再假定两根杆是无限长的，只有起点而没有终点。这两个坐标系只用一只钟就够了，因为时间的流逝对这两个坐标系是一样的。在观察开始的时候，两根杆的起点是重合的。这个时候，一个质点的位置在两个坐标系中都是用同一个数字来表示的。这个质点的位置跟杆的刻度上的某一点是重合的，这样我们就得到决定这个质点的位置的数字。但是假如两根杆相对做匀速运动，在运动了一段时间以后（譬如说一秒钟之后），表示位置的数字就各不相同了。试看图52中，静止在上面的杆上的一个质点，在上面的坐标系中决定它的位置的数字并不随时间而改变，但是在下面的杆上的相应数字却是随时间而改变的。我们不说“对应于质点的位置的数字”，而常常简单地说成“**质点的坐标**”。虽然后面这句话听来似乎很深奥，但从图上看来却是正确的，而且它所表示的意思是极简单的。质点在下面的坐标系中的坐标等于它在上面的坐标系中的坐标加上上面的坐标系的起点坐落在下面的坐标系中的坐标。重要的是，假如我们知道质点在一个坐标系中的位置，便能计算它在另一个坐标系中的位置。为此，我们必须知道在每个时刻这两个坐标系的相对位置。其实上面这些话，是很简单的，如果不是因为后面要用它，还不值得做这样详细的讨论。

这里我们要注意一下决定一个质点的位置和决定一个事件的时间的差别。每一个观察者都有他自己的杆作为他的坐标系，但是他们却共用

一只钟。时间有点像“绝对的”，它对于所有坐标系中的所有观察者都是同样流逝的。

现在再举一个例子。有一个人以每小时3英里的速度在一艘大船的甲板上散步。这是他相对于船的速度，或者换句话说，是他相对于严密地关联于船的坐标系的速度。假使船相对于岸的速度是每小时30英里，而人与船的匀速直线运动的方向又相同，则这个散步的人，相对于一个岸上的观察者的速度是每小时33英里，或者相对于船是每小时3英里。我们可以把这种情况说得更抽象一些：一个质点相对于下面的坐标系的速度，等于它相对于上面的坐标系的速度，加上或减去（究竟是加或减，得看速度的方向是相同还是相反）上面的坐标系相对于下面的坐标系的速度（图53）。因此假如我们知道两个坐标系的相对速度，就不仅可以把一个坐标系的位置转换到另一个坐标系的位置，而且可以把一个坐标系的速度转换到另一个坐标系的速度。位置或坐标以及速度是在不同的坐标系中便不相同的几种量，然而都是以某种（在这个例子中是很简单的）**转换定律**联系起来。

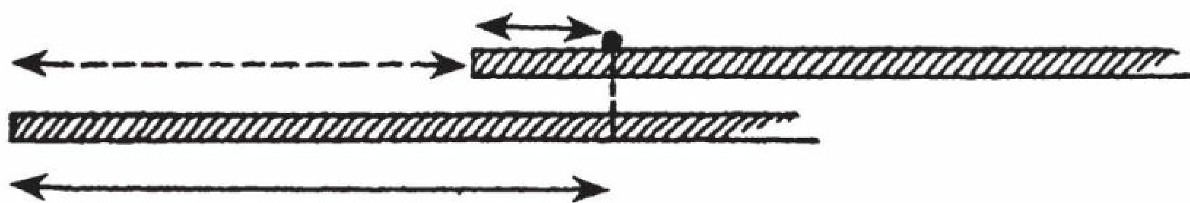


图52

可是有些量在两个坐标系中都是相同的，所以它们用不到转换定律。例如在上面的杆上不是取定一点而是取定两点，并考察它们之间的距离。这个距离便是两点的坐标之差。为了要找出这两点对于不同的坐标系的位置，我们必须应用转换定律。

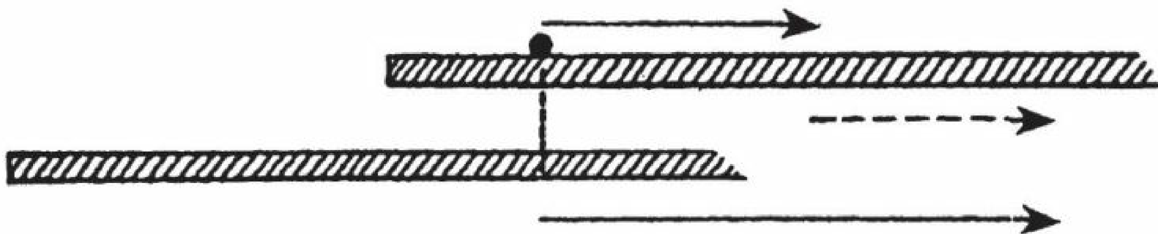


图53

但是在构图的过程中，两个位置之间的坐标之差由于不同坐标系所产生的影响已相互抵消了，这在图54中可以很明显地看到。我们得先加上，然后减去两个坐标系的起点之间的距离。因此两点之间的距离是**不变的**，也就是说它与坐标的选择无关。

另一个与坐标系无关的量的例子是速度的改变，这是我们在力学中已很熟悉的一个概念。假如从两个坐标系去观察一个沿直线运动的质点。对每一个坐标系中的观察者来说，它的速度的改变等于两个速度之差，而两个坐标之间的匀速相对运动所产生的影响在计算两者之差的过程中消去了。因此，速度的改变是一个不变量。但是有一个条件，即两个坐标系的相对运动必须是匀速直线的。不然，在每个坐标系中速度的改变也会不同，这种差异是由于代表我们的坐标系的两根杆的相对运动的速度改变所致。

现在举最后一个例子。设有两个质点，作用于其间的力只与距离有关。在匀速直线运动的情况下，距离是不变量，因而力也是不变量。因此把力和速度的改变联系起来的牛顿定律，在两个坐标系中都是有效的。我们又一次得到了一个为日常经验所确认的结论：假如力学定律在一个坐标系中是有效的，则它们在对应于这一个坐标系做匀速直线运动的一切坐标系中都是有效的。当然，我们的例子是很简单的，是一种直线运动的例子，其中的坐标系可以用一根坚硬的杆来表示。但是我们的结论大体上是普遍有效的，可以被概括为下列几条：

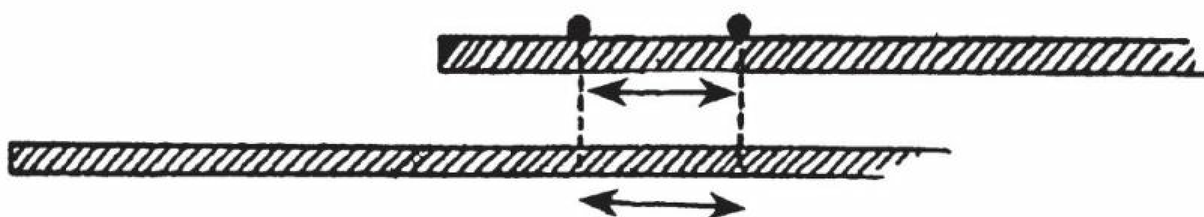


图54

1．我们不知道有什么法则可以找出一个惯性系。可是，如果假定出一个来，我们便可以找到无数个。因为所有互相做匀速直线运动的坐标系，只要其中有一个是惯性系，则它们全部是惯性系。

2．与一个事件相对应的时间，在一切坐标系中都相同。但坐标与速度却都不相同，它们依照转换定律而变化。

3．虽然坐标与速度由一个坐标系过渡到另一个坐标系时是改变的，但是，力与速度的改变对于转换定律都是不变的，因而所有的力学定律对转换定律也是不变的。

我们把上面所表述的坐标与速度的转换定律称为**经典力学的转换定律**，或简称为**经典转换**。

以太与运动

伽利略相对性原理用在力学现象中是有效的。在所有做相对运动的惯性系中，都可以应用同样的力学定律。对于非力学的现象，尤其是对于场的概念居于重要地位的那些现象，也都能应用这个原理吗？与这个问题有关的一切问题，立刻把我们带到相对论的出发点。

我们记得在**真空**中，或者换句话说，在以太中，光的速度是每秒186　000英里，而光就是在以太中传播的电磁波。电磁场储藏着能，这

种能一旦从它的源辐射出去，便独立存在。虽然我们已充分感觉到以太的力学结构上确有许多困难，但目前我们还将继续承认以太是传播电磁波的介质，因而也同样承认以太是传播光波的介质。

设想我们坐在一个封闭的房间里，这个房间与外界完全隔绝，空气既不能进去也不能出来。如果我们静坐着说起话来，从物理学的观点来说，我们在创造声波，这种波从静止的声源以空气中的声速传播。假如口与耳之间没有空气或别的介质，我们便听不到声音。实验表明，如果没有风，并且对于我们所选择的坐标系来说空气是静止的，那么声音在空气中向各个方向的传播速度都是一样的。

现在我们想象房间穿过空中做匀速直线运动。一个在外面的人可以透过运动着的房间（你把它说成火车也可以）的玻璃墙看到里面所发生的一切。室外的人可以根据室内的观察者的测量结果，推算出声音对于与他的环境相联系的一个坐标系的速度，而房间就是相对于这一个坐标系做运动的。这里又是前面那个老的、被讨论了很多次的问题：假使知道一样东西在一个坐标系中的速度，如何决定它在另一个坐标系中的速度。

房内的观察者宣称：在我看来，声音在各个方面的速度都是一样的。

外面的观察者宣称：在运动着的房间内传播的而用我的坐标系来确定的声音的速度，在各个方向并不相等。在房间运动的方向上的声速比标准声速要大些，在相反的方向上则比较小些。

这些结论都是从经典转换推导出来的，而且可以用实验来确证。房间把它里面的物质介质，即声音赖以传播的空气带着运动，因此声速对于里面和外面的观察者是不同的。

我们还可以根据把声看作在物质介质中传播的波的理论从而推导出另外的结论。如果我们不想听到演说者的声音，我们可以这样做（虽然这不是一种最简单的方法）：我们相对于演说者周围的空气以大于声速

的速度向前奔跑。于是发出的声波永远也不会到达我们的耳鼓了。反之，假使我们忘掉了一句永远不再重复的重要的话，我们必须以大于声速的速度，赶上早已过去了的声波去听到那句话。这两个例子并没有什么不合理的地方，不过难的是在这两种情况中我们都必须以每秒约400码的速度奔跑，但是我们完全可以想象，技术的进一步发展将使这样的速度成为可能。从大炮里发射出来的炮弹的速度实际上比声速大，因而骑在这样一个炮弹上的人便永远听不到发射炮弹的声音。

所有这些例子都纯粹是力学性质的，我们现在可以提出一个非常重要的问题了：我们刚才对声波所说的一切情况是否可以同样应用于光波的情况呢？伽利略相对性原理和经典转换是否在应用于力学观象的同时也可以用于光的现象和电的现象呢？假如对于这些问题简单地回答一个“是”或“否”，而不深究它们的意义，那是很危险的。

在相对于外面的观察者做匀速直线运动的房间中的声波的例子中，插入下面两段话对于我们的结论是非常重要的：

运动着的房间带着传播声波的空气一起运动。

在相对做匀速直线运动的两个坐标系中观察到的速度是用经典转换联系起来的。

关于光的相应的问题必须用稍微不同的方式来表述：室内的观察者不再是说话，而是向各个方向发出光的信号或光波。我们进一步假定发出信号的光源是永远静止在房间里的。光波在以太中运动正如声波在空气中运动一样。

房间是否带有以太一起运动，像带有空气一起运动那样呢？因为我们没有以太的力学结构，所以很难回答这个问题。假如房间是封闭的，里面的空气便不得不随着它运动。假如想象以太也如此，很明显，这是毫无意义的，因为所有的物质都浸在它里面，而且它是穿透到任何地方去的。任何门都关不住以太。所谓“运动着的房间”，现在的意思只是指光源跟它严密地相联系的运动着的一个坐标系而已。可是我们并非绝对

不能想象房间的运动把光源和以太带着一起运动，正如关着的房间把声源和空气带着一起运动一样。但是我们也可以同样好地想象出一种相反的情况：房间在以太中通过，正如船在绝对平静的海中通过一样，不把介质的任何部分带走，而只是通过它。在我们的第一种图景中，房间带着光源运动，也带着以太运动。在这种情况中，可以把光波比拟为声波，因而可以得出完全相似的结论。在我们的第二种图景中，房间带着光源运动，但不带着以太运动；在这种情况中，就不能和声波比拟了，因而在声波的例子中所得出的结论便不能被应用于光波。这是两个极端的可能性。我们还可以想象更复杂的可能性，例如以太只是部分地被带有光源的房间的运动带走。但是，在找出这两种比较简单的极端情况中哪个更适合实验之前，没有理由讨论更复杂的假定。

我们从第一种想象开始，并暂且假定：严密地联结于光源的运动着的房间把以太一起带走。假如我们相信那简单的应用于声波速度的转换原理，现在我们也可以把前面的结论应用到光波里来。我们没有理由怀疑简单的力学的转换定律，这个定律不过是说在某种情况中速度必须相加，在别的情况中速度必须相减。因此我们暂时认定和光源一起运动的房间带着以太走，同时认定经典转换。

如果我们打开灯，如果光源是严密地跟我们的房间相联系，那么光的信号的速度为著名的实验值每秒186 000英里。但是外面的观察者会注意到房间的运动，因而也就注意到光源的运动，并且注意到以太是被带着走的，他必然会得出这个结论：在我所处的外面的坐标系中，光在不同的方向上的速度是不同的。在房间运动的方向上比标准光速要大，在相反的方向则较小。我们的结论是：假如以太被带着光源而运动的房间带走，而且假定力学定律是有效的，则光速必定与光源的速度有关。假如光源朝着我们运动，则光从运动的光源到达我们眼睛的速度就会较大；假如光源背离我们而运动，光速就会较小。

假如我们的速率比光速更大，那么我们可以逃避光的信号。我们可以赶上早前已经发送出去的光波，而看到过去所发生的事件。我们赶上

它们的次序正和当初发送它们的次序相反，而我们在地球上所发生的一系列事件，看来就会像一个倒映的电影一样从故事的结局开始。这些结论都是从"运动的坐标系把以太带走以及力学转换定律是有效的"这样一个假设中推导出来的。如果这些结论能成立，光和声之间的比拟就是完整的了。

但是，没有任何迹象表明这些结论是真实的。恰恰相反，为了证明这些结论而做的所有观察反而否定了它们。因为光速的数值太大，要直接做一个实验有很多技术上的困难，所以这个判决是从颇为间接的实验中得来的，不过它的明确性是完全无可怀疑的。**不论发射的光源是不是在运动或它是怎样运动的，在所有的坐标系中光速都是相同的**。

这个重要的结论可以从许多实验中得出来，我们不准备描述这些实验。但是我们可以做出一些非常简单的论证，虽然它不能证明光速与光源的运动无关，但它能使人觉得这种情况是可信而又可以理解的。

在我们的行星系中，地球与其他的行星都绕着太阳运动。我们不知道是否还存在着与太阳系相似的别的行星系。不过还存在着许多所谓双星系，它们是由两个星球组成并围绕一点而转动，这个点被称为双星的重心。对这种双星的观察表明，牛顿的引力定律是有效的。现在，假定光的速率跟发射体的速度有关。那么从星球发出的光是快是慢，就要看星球在发光时的速度是怎样的。在这个情况中，整个运动就会非常混乱，而且在很远的双星的情况中，根本不可能确认主宰我们整个行星系运动的同一个万有引力定律的有效性。

我们再来考察另一个根据非常简单的观念来做的实验。设想有一个旋转得很快的轮子。根据我们的假定，以太被轮子的运动带走，并且是参加运动的。通过轮子旁边的光波的速率会因轮子的静止或运动而有所不同。静止的以太中的光速和被轮子的运动带动的以太中的光速有所不同，正如声波的速度在无风的和有风的日子有所不同。但是，我们并没有探测到这样的差异！不论我们从哪一个角度来接近这个问题，不论我们设计出什么样的判决实验，结果总是跟以太被运动带走的假定相矛

盾。因此，我们借助于一些更详细的专门论证做出如下的考察结果：

> 光的速度与光源的运动无关。
>
> 不能认定运动的物体带动周围的以太。

因此我们必须放弃声波与光波的比拟，并转而研究第二种可能性：所有的物质都是在以太中运动，而以太不参加任何运动。这就意味着我们要假定有一个以太海，所有的坐标系都静止在以太海中或相对于以太海运动。我们暂且抛开实验能否证明或驳斥这个理论的问题，最好先把这个新假设的意义以及能由它推导出来的结论更好地熟悉一下。

有这样一个坐标系，它相对于以太海是静止的。在力学中，许多相对做匀速直线运动的坐标系中没有一个可以将它区别开来。所有这样的坐标系都是“好的”或是“坏的”。假如有两个相对做匀速直线运动的坐标系，在力学中要问哪一个在运动，哪一个是静止，是毫无意义的。我们只能观察到相对的匀速直线运动。因为在伽利略相对性原理中，我们不能谈绝对的匀速直线运动。如果说不仅存在**相对的**匀速直线运动，而且存在**绝对的**匀速直线运动，这句话的意义是怎样的呢？这不过是说，有一个坐标系，在它里面有些自然定律和所有别的坐标系中的不同。因而这意味着每一个观察者都可以用在他的坐标系中有效的定律，跟只在一个专做标准的坐标系中有效的定律加以比较，来判定他自己的坐标系究竟是在运动还是静止。这里的情况跟经典力学不同；在经典力学中，由于伽利略惯性定律的关系，绝对的匀速直线运动是毫无意义的。

如果我们假定运动是通过以太的，那么在场的各种现象中，可以得出什么结论呢？这意味着有这么一个跟所有别的坐标系都不同的坐标系，它相对于以太海是静止的。很明显，在这个坐标系中，有些自然定律一定是不同的，否则，“运动通过以太”这句话便没有意义了。如果伽利略相对性原理是有效的，则运动通过以太绝不会有任何意义。这两种观念是不可能协调的。可是，假如存在一个由以太所确定的特别坐标

系，那么“绝对运动”或“绝对静止”的说法才有明确的意义。

我们实在选不出哪一个假设是完善的。我们曾经做过坐标系在其运动中把以太带走的假设，以为这样可以保全伽利略的相对性原理，但是结果发现它与实验不符。剩下的唯一的办法，就是放弃伽利略相对性原理，并试用一切物体都在平静的以太海中通过的假设。

下一步就是考察与伽利略相对性原理相矛盾而支持运动通过以太的几种结论，然后用实验来检验它。这样的实验很容易想象，但是很难做。因为这里只考究观念，因而不必顾虑技术上的困难。

我们再回头研究运动的房间和两个观察者（一个在房内，一个在房外）。外面的观察者选定用以太海定名的标准坐标系。这是一个与众不同的坐标系；在这个坐标系中，光速永远具有同样的标准数值。在以太海中的所有光源——不管是静止的还是在运动的——传播出来的光的速度总是一样的。房间和房内的观察者都是穿过以太而运动。设想在房间中央突然发出光，随即熄灭；此外，设想房间的墙是透明的，因而内外两个观察者都能够测量光速。假如我们问这两个观察者，他们想得到什么样的结果，他们的回答大概会是这样的：

外面的观察者：我的坐标系是以太海。在我的坐标系中，光速总是一个标准值。我不必理会光源或其他物体是否在运动，因为它们绝不会把以太海带走。我的坐标系跟其他所有的坐标系不同。在这个坐标系中，不管光束或光源运动的方向如何，光速必须是一个标准值。

里面的观察者：我的房间是穿过以太海而运动的。房间的一扇墙在离开光，而另一扇墙在向光靠拢。假使房间相对于以太海以光速在运动，那么从房间中央辐射出去的光永远到达不了离开它运动的那扇墙。假如房间运动的速度较光速小，那么从房间中央辐射出去的光波到达这一扇墙比到达另一扇墙会早些。它到达朝光波运动的墙，会在到达离开光波运动的墙之前。因此虽然光源与我的坐标系紧密相连，但各个方向上的光速却不会一样。在相对于以太海运动的方向上，它比较小，因为墙在离开，在相反的方向上，它比较大，因为墙迎着光波运动，所以接

触光波更早些。

因此，只有在以太海所特定的一个坐标系中，各个方向上的光速是相等的。在其他相对于以太海运动的坐标系中，光速与我们进行测量的方向有关。

刚才所考察的判决实验使我们能够检验这个通过以太海的运动的理论。事实上，自然界向我们提供了一个运动速度相当高的系统——每年围绕太阳运转一次的地球。如果我们的假设是正确的，那么在地球运动的方向上的光速跟相反方向上的光速将会不同。这种速度之差是可以计算的，并且可以设计出一个适当的实验加以验证。根据这个理论，这里所发生的将是一个很小的时间之差，因此必须设计出一个很巧妙的实验装置。有名的迈克尔逊——莫雷（Morley）实验就是为了这个目的而设计的。其结果是把那一切物质都在静止的以太海中通过的理论判决了死刑。它未发现光速与方向有什么关系。如果认定了以太海的理论，那么不仅光速，其他的场的现象都会显示出它们与运动着的坐标系的方向有关。每个实验都和迈克尔逊——莫雷实验一样，得出了否定的结果；从来没有发现过与地球运动的方向有任何关系。

情况愈来愈复杂了。两个假设都已经被检验过了。第一个是说，运动的物体把以太带走。光速与光源的运动无关的事实把这个假设驳倒了。第二个是说，有一个特定的坐标系，运动的物体不把以太带走，而只在永远静止的以太海中通过。假使是这样，那么伽利略相对性原理便是无效的，而在每一个坐标系中的光速便不会相等。但我们用实验又把它驳倒了。

更为牵强的许多理论也都被拿来试过了，例如我们假定真理是处在这两个极端情况之间：以太只是部分地被运动的物体带走。但是，它们都失败了。每一次企图用以太的运动、通过以太的运动，或同时用这两种运动来解释运动坐标系中的电磁观象，都没有成功。

于是，科学史上最戏剧性的情况出现了。所有以太的假设都一无是处！实验的判决总是否定的。回顾一下物理学的发展，我们看到以太自

出生以来便是具体物质这个家族中的一个顽童。第一，构成一个以太的简单的力学模型已被证明是不可能的，因此我们把这个工作放弃了。这在很大程度上导致了机械观的崩溃。第二，我们已经放弃了依靠以太海的存在从而可以特别定出一个坐标系，使我们承认不但有相对运动而且还有绝对运动的希望。除了以太能把波带走的假说以外，这就是显示和支持以太存在的唯一假设了。我们想使以太成为实在的东西的一切努力都失败了。它既不显示它的力学结构，又不显示绝对运动。除了发明以太时所赋予它的一种性质，即传播电磁波的能力以外，其他任何性质都没有了。我们力图发现以太的性质，但一切努力都引起了困难和矛盾。经过这么多的失败之后，现在应该是完全丢开以太的时候了，以后再也不要提起它的名字了。我们说：我们的空间有传播波的物理性质，这样便不必再用我们已决定避免的这个名字。

在我们的字典中勾销一个字自然是于事无补的。要这样去解决，我们的困难实在太多了！

我们现在把已经被实验充分确认了的论据写下来，而不再顾虑“以太”问题。

1．光在空中的速度永远为标准值，它与光源及光的接受者的运动无关。

2．在两个相对做匀速直线运动的坐标系中，所有的自然定律都是完全等同的，因而无法分辨出绝对的匀速直线运动。

有许多实验确认了这两点，没有一个实验跟其中任一点矛盾。第一点表示光速的不变性，第二点把应用于力学现象的伽利略相对性原理推广到了一切自然现象中。

在力学中，我们已经知道：假如一个质点对于一个坐标系的速度是若干，那么它在另一个对第一个坐标系做匀速直线运动的坐标系中的速度就不相同。这是根据简单的力学转换原理推导出来的。它们是直接从我们的直观（一个人相对于船和岸运动的例子）中得来的，因而显然不

会有什么错误。但是，这个转换定律跟光速的不变性是矛盾的。换句话说，我们得加上第三个原理：

3．位置与速度是根据经典转换从一个惯性系转换到另一个惯性系的。

于是，矛盾就很明显了。我们不能把上述三点结合在一起。

任何对经典转换加以改变的企图看来是不可能的。我们已经设法改变过第一点和第二点，但与实验不一致。关于“以太”的所有运动理论都要求更改第一点和第二点。但这没有带来任何好处。我们再一次认识到我们的困难的严重性。必须有新的线索来谋求解决。这个线索是**接受第一和第二点的基本假定**，而看来奇怪得很，要**放弃第三点**。这个新线索是从分析最基本和最简单的概念开始的。我们将要表明这个分析如何迫使我们改变我们的旧观点，从而解除了所有困难。

时间、距离、相对论

我们的新假设是：

1．在所有相互做匀速直线运动的坐标系中，光在真空中的速度都是相同的。

2．在所有相互做匀速直线运动的坐标系中，自然定律都是相同的。

相对论就是以这两个假设为开端的。从现在起，我们不再运用经典转换了，因为我们知道它和这两个假设相矛盾。

在这里，跟科学工作中常常所做的一样，需要把自己根深蒂固的、常常未经评判便加以接受的偏见除掉。因为我们已经知道，如果把上节

中的第一点和第二点加以改变，就会导致跟实验发生矛盾，所以我们必须有勇气坚定地承认它们是正确的，而攻击那可能攻得下的弱点，即位置与速度从一个坐标系转换到另一个坐标系中的方法。我们的意图是从第一点和第二点推出结论，研究一下这两个假设跟经典转换相矛盾的地方在哪里，是怎样矛盾的，并找出所得到的结果的物理意义。

我们再来利用房内房外有两个观察者的运动着的房间的例子。假设一个光的信号由房间的中央发射出去，我们再问这两个人，他们想观察什么，这时候他们只承认上面的两个原理，完全丢掉了以前说过的关于光穿过介质而传播的论据。我们把他们的回答引用如下：

里面的观察者：从房间中央发出的光的信号会同时到达房间的各个墙上，因为四扇墙与光源的距离相等，而光在各方向上的速度又是相等的。

外面的观察者：在我的坐标系中，光的速度与随着房间运动的观察者的坐标系中所看到的完全一样。在我的坐标系中，光源运动与否毫无关系，因为光源的运动并不影响光速。我所看到的只是光的信号同样以标准速率向各个方向行进。一扇墙要奔离光的信号，而另一扇墙要接近光的信号。因此信号到达那扇奔离的墙比到达那扇接近的墙要稍微迟一些。假使房间的速度比光速小很多，那么，虽然信号到达两扇墙的时间之差也会小很多，但信号绝不会完全同时到达与运动方向相垂直的两扇相对的墙。

比较这两个观察者的预言，我们会发现一个非常惊人的结果，这种结果显然跟经典物理学上极有根据的概念相矛盾。现在发生了两个事件，两束光到达两扇墙，在房内的观察者看来，它们是同时到达的，而房外的观察者却认为它们不是同时到达的。在经典物理学中，对在任何坐标系中的观察者来说，用的都是同一只钟，时间的流逝是一样的。因此，时间和“同时”“早些”“迟些”等词一样，都有一种与任何坐标系无关的绝对意义。在一个坐标系中同时的（即时间过程相同的）两件事，在任何其他坐标系中也必定是同时的。

上述两个假设，也就是相对论，使我们不得不放弃这种观点。我们已经描述过，在一个坐标系中同时的两个事件，在另一个坐标系中却不是同时的。我们的任务就是要了解这个结果，了解“在一个坐标系中同时的两个事件，在另一个坐标系中可能不是同时的”这句话的意义。

“在一个坐标系中同时的两个事件”表示什么意思呢？每个人在直觉上似乎都知道这句话的意思。但是我们的见解必须谨慎些，并力求做出严格的定义，因为我们知道太重视直觉实在太危险。我们首先来回答这个简单的问题。

一只钟究竟是什么呢？

时间流逝的原始的、主观的感觉使我们能够排列出印象的次序，以断定这件事发生得早些，那件事发生得迟些。但是要表示两个事件之间的时间间隔为十秒钟，就需要一只钟。由于使用了一只钟，时间的概念就变成客观的了。任何物理现象，只要它能够照原样重复任意次，都可以被当作一只钟。如果我们取这个现象的首尾之间的时间作为时间的单位，那么重复这个过程就可以测定任何时间间隔。所有的钟，从最简单的沙漏到最精密的仪器，都是以这个观念为基础的。例如使用沙漏的时间单位便是沙由上面的玻璃瓶流到下面的玻璃瓶的时间间隔，把玻璃瓶倒转过来就可以重复这个物理过程。

在两个离得很远的点上有两只完好无损的钟，它们上面所指示的时刻完全一样。不论我们用哪种方法来对这句话做出实验验证，它总应该是正确的。但是，它是在表示什么意思呢？我们怎样才能确信两只距离很远的钟所指示的时刻是完全一样的呢？一个可能的办法就是使用电视。必须了解，电视只用来作为一个例子，它在我们的论证中并不重要。我们可以站在一只钟的旁边而看着另一只钟在电视屏幕上的影像。于是我们可以判断它们是否显示着相同的时刻。但是这不会是一个好的证明。电视中的影像是由电磁波传递的，因此是以光速传播的。我们在电视屏幕上所看到的影像是在一个非常短的时间以前发出的，而我们在真实的钟上所见到的时刻却是现在发生的。这种困难很容易被避免。我

们必须在这两只钟的距离的中点处摄取这两只钟的电视图，在这个中点上观察它们。如果信号是同时发出的，它们也同时到达中点处。假使从中点上所观察到的两只好钟一直指示相同的时间，那么它们便适宜于用来指示距离很远的两点上的时间。

在力学中，我们只用了一只钟。但这不是很方便，因为我们必须站在这只钟的附近进行所有的测量。假如从远处望钟，例如用电视的方法从远处望钟，我们必须时常记住：我们现在所看到的实在是过去发生的，正如在看日落时，我们是在日落发生的8分钟以后才看到的。我们读记下来的时刻都必须根据我们与钟的距离做相应的修正。

因此，只有一只钟是不方便的。但是现在我们既已知道怎样判断两只或者更多只钟是否同时指示一个时刻，是否走得一样，便很容易想象在给定的坐标系中可以随我们的意思设置多少只钟。其中每一只都可以帮助我们决定它的近旁所发生的事件的时间。所有这些钟相对于坐标系都是静止的。它们都是“好”钟；它们都是**同步**的，就是说在同一时间显示相同的时刻。

关于钟的这样布置并不是一件特别奇怪的事情。我们现在用很多只同步的钟来代替从前的只用一只，因此很容易判断在给定坐标系中，两个相距遥远的事件是否同时发生。假使两个事件发生时，它们附近的同步的钟都指示出同样的时刻，它们便是同时的。两个相距很远的事件中的一个比另一个发生得早些的说法现在就有了确定的意义。这种情况都可以用静止在我们的坐标系中的同步钟来判断。

所有这些都是跟经典物理学一致的，也没有一点跟经典转换相矛盾的地方。

为了确定同时的事件，利用信号来使钟同步。在我们的布置中，重要的一点是，信号是以光速传播的，光速在相对论中担负着极为重要的任务。

因为我们要讨论两个相对做匀速直线运动的坐标系的重要问题，我

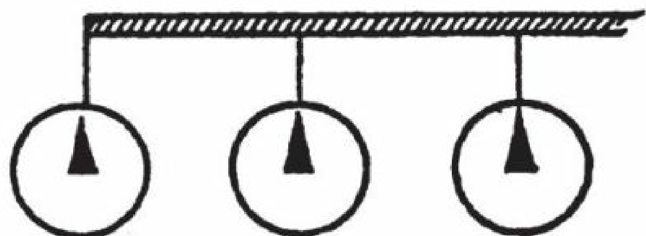
们必须考察两根杆，每根杆上装有一些钟。这两个坐标系相对做匀速直线运动，在每个坐标系上的观察者现在都有了他自己的标尺和装牢在标尺上的一组钟。

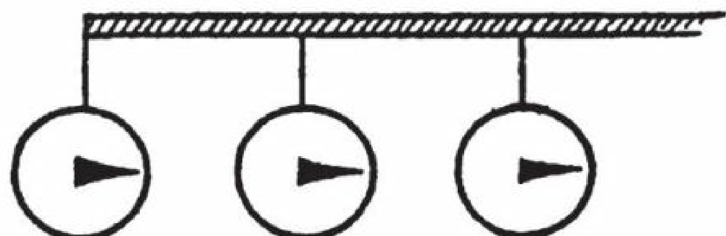
在以前用经典力学讨论测量时，针对所有的坐标系，我们只用一只钟。现在我们在每一个坐标系中却用上了许多只钟。这个区别并没有什么重要意义。一只钟就够了，但是只要它们是很好的同步的钟，绝没有人反对用很多只钟。

现在我们接近指出经典转换跟相对论矛盾的主要观点上了。假如两组钟相对做匀速直线运动，结果会发生什么呢？持有经典观点的物理学家回答说：没有什么；它们还会走得一样快，因而我们既可以用运动的钟，也可以用静止的钟来指示时间。按照经典物理学，两个事件在一个坐标系中是同时的，在任何其他的坐标系中也是同时的。

但是，这不是唯一可能的答案。我们同样可以想象一只在运动中的钟跟一只静止着的钟，其机械运转的步调（走的快慢）是不同的。我们现在来研究这种可能性，暂时不必确定钟在运动时是否真会改变其步调。说一只运动的钟会改变步调是什么意思呢？为简单起见，我们假定在上面的坐标系中只有一只钟，而在下面的坐标系中有许多只。所有的钟的机构都相同，而下面的几只钟是同步的，就是说它们同时指示相同的时刻。我们把相对运动的两个坐标系的三个接连发生的位置表示在图55中，在第一图中，上面一只和下面三只钟的指针位置照例是一样的，因为我们原来是这样安排的。在第二图中，我们看到两个坐标系在过了一段时间以后的相对位置。所有在下面的坐标系中的钟都指示着相同的时刻，但是在上面的坐标系中，钟的步调却变了。由于这只钟是相对于下面的坐标系在运动，所以它的步调变了，时间不同了。在第三图中，我们看到钟的指针位置的差异随时间而增大了。





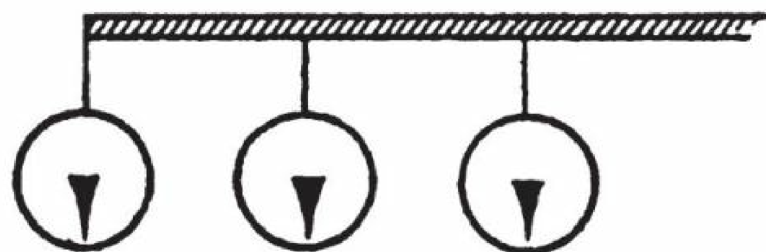



图55

一个静止在下面的坐标系中的观察者会发现一只运动的钟会变更它的步调。自然，如果钟相对静止在上面坐标系中的观察者而运动，也会发现同样的结果；在这种情形中，上面的坐标系中要有许多只钟，而下面的坐标系中却只要一只钟。在两个相对运动的坐标系中的自然定律必定是相同的。

在经典力学中，我们默认了一只运动的钟不会改变步调。这似乎太明白了，简直不值得再提起它。但是没有什么事情是显而易见的；假如我们要做得认真些、谨慎些，那么必须分析物理学中迄今被认为是理所当然的假设。

我们不能够仅因为一个假设跟经典物理学中的假设不同就认为它是不合理的。我们可以很容易地想象一只运动的钟会改变它的步调，只要这种改变的规律对所有的惯性系都是相同的。

再举一个例子。试取一根米尺，这意味着它静止在一个坐标系中时长为1米。现在让它做匀速直线运动，在代表坐标系的杆上滑过。它的长度还会是1米吗？我们必须预先知道怎样去决定它的长度。当杆是静止的时候，它的两端跟坐标系上相隔1米的两个刻度重合。由此我们断定：静止的杆的长度等于1米。当尺在运动时，我们又怎样测量它的长度呢？可以用下面的方法进行。在给定时刻，两个观察者同时拍快照，一个拍运动的尺的始端，一个拍末端。由于照片是同时拍摄的，我们可以把尺的始端和末端跟坐标系重合的那个刻度比较。用这种办法，我们就可以决定它的长度。两个观察者必须在给定坐标系的不同部位观察同时产生的现象。我们没有任何理由认为这样的测量结果会跟尺在静止时的结果相同。因为照片必须是同时拍摄的，所谓同时，我们已经知道是与坐标系有关的一个相对的概念，因此在互做相对运动的不同的坐标系中，这种测量似乎很可能得出不同的结果。

我们很能想象，如果改变的规律对所有的惯性坐标系都是相同的，

那么不仅运动的钟会改变它的步调，一根运动的尺也会改变它的长度。

我们只讨论了几种新的可能性，但都没有做出认定这些可能性的任何证明。

我们记得在所有的惯性坐标系中，光速都是一样的。这一情况跟经典转换是不相符的。闷葫芦必须在某处被打开。难道就在这里吗？我们难道不能假定运动的钟的步调和运动的杆的长度会改变，而由这些假定便直接推出光速的不变性吗？我们是能够的！这就是相对论和经典物理学根本不同的第一个例子。我们的论证可以倒过来说：假如光速在所有的坐标系中都是一样的，则运动的杆必须改变其长度，运动的钟必须改变其步调，掌握这些改变的定律就被严格地确定出来了。

这一切都没有什么神秘和不合理的地方。在经典物理学中，总是假定运动的钟和静止的钟都有相同的步调，假定运动的杆和静止的杆都有相同的长度，假如在所有的坐标系中光速都是相等的，假如相对论是有效的，那么我们必须牺牲这个假定。这些根深蒂固的偏见是很难被消除的，但是除此以外别无他法。从相对论的观点看来，旧概念似乎是很武断的。为什么要像前几页中所说的那样，相信对于所有坐标系中的一切观察者都是以同样的方式流逝的那种绝对时间呢？为什么要相信距离是不可能变的呢？时间是由钟决定的，空间坐标是由杆决定的，而决定的结果很可能与钟及杆在运动时的行为有关。我们没有理由相信它们的行为会依照我们所希望的方式来做。通过电磁场现象的观察间接地指出，一只运动的钟会改变它的步调，一根运动的杆会改变它的长度，而在力学现象中，我们不会想到会有这种情况发生。我们必须接受每个坐标系中的相对时间的概念，因为这是解决困难最好的出路。从相对论中发展出来的另外的科学成就表明，不应当把这个新的概念看作不得已才接受的东西，因为这个理论的功绩是非常显著的。

到目前为止，我们只是力求说明什么东西使我们做出相对论的基本假设，以及相对论如何迫使我们重新研究和修改经典转换，并用新的概念来对待时间和空间。我们的目的是要指出作为新的物理学和哲学观点

的基础的观念。这些观念都是简单的，但是在这里已经提出的形式中，它们还不足以得出任何结论，不仅定量的结论得不到，定性的结论也得不到。我们必须再用那些老方法，即只解释主要观念，而不加证明地陈述其他一些观念。

为了弄清楚相信经典转换的古代物理学家（称之为古）和相信相对论的现代物理学家（称之为今）在观点上的区别，我们设想他们之间进行了下面的对话：

古：我相信力学中的伽利略相对性原理。因为我知道在两个相对做匀速直线运动的坐标系中，力学定律是相同的。或者换句话说，按照经典转换，这些定律是不变的。

今：但是相对性原理必须应用于我们外界的一切现象。在相对做匀速直线运动的坐标系中，不仅力学定律相同，所有的自然定律都必须是相同的。

古：但是在相对运动的坐标系中，所有的自然定律怎么能相同呢？场方程（即麦克斯韦方程）对于经典转换不是不变的。这是由光速的例子中可以明白看出来的。依照经典转换，这个速度在两个相对运动的坐标系中并不是一样的。

今：这只表明经典转换是不能应用的，因而这两个坐标系之间必须有一种与经典转换不同的关系，而且我们不能像这个转换定律中所做的那样，把不同坐标系中的坐标和速度联系起来。我们必须代之以新的定律，并从相对论的基本假设中把它们推导出来。我们暂且不管这个新转换定律的数学表示，只要知道它与经典转换不同就够了。我们把它称为**洛仑兹转换**（Lorentz Transformation）。可以证明，麦克斯韦方程组（场的定律）对于洛仑兹转换是不变的，正如力学定律对于经典转换是不变的。我们来回忆一下经典物理学中的情况：坐标有坐标的转换定律，速度也有速度的转换定律，但是两个相对做匀速直线运动的坐标系中的力学定律却是相同的。空间有空间的转换定律，但是时间却没有转换定律，因为时间在所有的坐标系中都是相同的。可是，在相对论中却

不同了。对于空间、时间和速度都有跟经典转换不同的转换定律。但是自然定律在所有相对做匀速直线运动的坐标系中又必须是相同的。自然定律必须是不变的，但是不是像前面那样对于经典转换，而是对于新型的转换，即所谓洛仑兹转换是不变的。自然定律在所有的惯性坐标系中都是同样有效的，而且从一个坐标系转换到另一个坐标系是用洛仑兹转换来表示的。

古：我相信你的话，但我很想知道经典转换和洛仑兹转换的差别。

今：你的问题最好照下面的方式来回答。你且说出一些经典转换的特色，然后让我来解释一下它们是否已保存在洛仑兹转换中，倘若没有，再解释它们为什么改变了。

古：假如在我的坐标系中有一个事件发生于某一地点某一时刻，则在另一个相对于我的坐标系做匀速直线运动的坐标系中的观察者，对于这个事件发生的位置会选用不同的数，但是时间当然还是相同的。在所有的坐标系中，我们只用同一只钟，因此与钟是否运动毫无关系。在你看来也是对的吗？

今：不，不对。每个坐标系必须配备有专用的钟，这只钟必须是静止的，因为运动会改变钟的步调。在两个不同的坐标系中的两个观察者，不仅会用不同的数来确定位置，而且会用不同的数来确定这个事件所发生的时刻。

古：这表示时间不再是不变的。在经典转换中，所有坐标系中的时间总是相同的。在洛仑兹转换中，时间是变化的，并且变得和经典转换中的坐标有点相似。我奇怪，对于长度又能怎样呢？根据经典转换，一根坚硬的杆无论在静止中或运动中都保持它的长度不变。现在这还对吗？

今：不对了。根据洛仑兹转换，一根运动的杆在运动的方向上会收缩，而且假如速率增加，收缩也会增加。一根杆运动得愈快，便显得愈短。但是，这种收缩只发生在运动的方向上，在图56中，你可以看到一

根杆运动的速度接近于光速的90%时，它的长度会缩到原来的一半，但在垂直于运动的方向上却没有收缩（图57）。



图56



图57

古：这表示一只运动的钟的步调和一根运动的杆的长度都与速度有关。但它们的关系怎样呢？

今：速度愈增加，这种改变愈明显。根据洛仑兹转换，假如一根杆的速度等于光速，则它的长度会整个缩完。同样，与它所沿着经过的杆上的钟相比，一只运动的钟的步调会逐渐慢下来；如果它以光速运动，那么它就会完全停止。

古：这似乎跟我们所有的经验都不相符。我们知道一辆汽车不会在运动的时候就短一些。我们也知道汽车司机常常可以拿他的“好”的钟和他所经过的路上的钟加以比较，而发现它们总是完全一致的。这就跟你的说法不同了。

今：这一点当然是对的。但是在力学中，所有这些速度与光速相比都小得很，因此把相对论应用到这些现象上是荒谬的。每个司机即使把速率增加几十万倍，也还能泰然地应用经典物理学，只有当速度接近光速时，才能期望实验与经典转换之间有不相符的地方。只有在速度很大时，才能检验洛仑兹转换的有效性。

古：但是还有另外一个困难。根据力学，我可以想象物体的速度甚至比光速更大。一个物体相对于移动的船以光速运动，则它相对于岸的速度应当比光速更大。当一根杆的速度等于光速时，它的长度便整个缩完，这样会发生什么情况呢？如果杆的速度大于光速，我们不能期望有一种负的长度。

今：你实在没有理由做这样的讽刺！根据相对论的观点，一个物体不可能有比光速更大的速度。光速是所有物体所能具有的速度的最大限度。如果一个物体相对于船的速率等于光的速率，那么它相对于岸的速率也等于光的速率。将速度加上或减去的简单的力学定律在这里不再适用了。或者更确切地说，它对小的速度若不求精确还是可用的，但是对于接近光速的速度就不能应用。表示光速的数明显地出现在洛仑兹转换中，并且像经典力学中的无限大速度那样成为一个极限的情况。这个更为普遍的理论与经典转换和经典力学并不矛盾。反过来说，当速度在非常小的极限情况下，我们又回到旧概念上来了。从新理论的观点上可以明白地看出，经典物理学在哪些情况中是有效的，在哪些地方是受到限制的。在汽车、轮船和火车一类的运动中应用相对论，就像在只用乘法表便可以的地方却使用了计算机一样可笑。

相对论与力学

相对论的兴起是由于实际需要，是由于旧理论中的矛盾非常严重和

深刻，而看来旧理论已经没法避免这些矛盾了。新理论的好处在于它在解决这些困难时很一致、很简单，只应用了少数几个令人信服的假定。

虽然这些理论是从场的问题上兴起的，但它应当概括所有的物理定律。这里似乎发生了一个困难。场的定律属于一方面，力学定律属于另一方面，这是两种完全不同的类型。电磁场方程对于洛仑兹转换是不变的，而力学方程对于经典转换是不变的。但是相对论要求所有的自然定律都必须对于洛仑兹转换不变，而不是对于经典转换不变。后者只是两个坐标系的相对速度很小时的特殊的极限情况。假使如此，经典力学必须加以改变，这样才能和对于洛仑兹转换的不变性的要求相一致。或者换句话说，经典力学在速度接近光速时就不再适用了。从一个坐标系转换到另一个坐标系，只存在一种转换，即洛仑兹转换。

把经典力学改变成既不与相对论相矛盾，又不与已经观察到的以及已经由经典力学解释出来的大量资料相矛盾，就很简便了。旧力学只能被应用于小的速度，而成为新力学中的特殊情况。

考察一下相对论引起经典力学中的改变的一些例子是很有趣的。这也许能使我们得到某些能用实验证明或推翻的结论。

假设一个具有一定质量的物体沿着直线在运动，并且在运动方向上受一个外力的作用。我们知道力是跟速度的改变成正比的。或者说得更清楚些：一个物体在一秒钟内无论速度从每秒100英尺增加到每秒101英尺，或从每秒100英里增加到每秒100英里零1英尺，或者从每秒180 000英里增加到每秒180 000英里零1英尺，都是无关紧要的。某一个物体在相同的时间内获得相同的速度改变，则施于该物体上的力总是相同的。

这句话从相对论的观点来看是对的吗？不！这个定律只是针对小的速度才有效。根据相对论，大到接近光速的速度的定律是怎样的呢？如果速度大了，再要增加速度便需要极大的力。把每秒100英里的速度增加每秒1英尺跟把每秒近于光速的速度增加每秒1英尺，所需的力绝不是一样的。速度愈接近光速，要增加它就愈难。当速度等于光速时，那么再要增加它已经是不可能的了。于是，由相对论引起的这种改变便不足

为奇了。光速是所有速度的最高限度。一个有限的力，不管它多么大，总不能把速度增加到超过这个限度。一种更复杂的力学定律出现了，它代替了联结力和速度改变的旧的力学定律。从我们的新观点看来，经典力学是简单的，因为在差不多所有观察中，我们所遇到的都是远比光速小的速度。

静止的物体具有一定的质量，被称为**静止质量**。我们在力学中知道，任何一个物体都要抵抗改变它运动的外力，质量愈大，抗力愈大，质量愈小，抗力也愈小。但是在相对论中却不仅如此。一个物体不仅由于静止质量较大而具有较大的阻止这种改变的抗力，而且如果速度愈大则抗力也愈大。在经典力学中，一个既定物体的抗力总是不变的，它仅由物体的质量来决定。在相对论中，它不仅与静止质量有关，并且与速度有关。当速度接近光速时，抗力便成为无限大。

刚才所指出的结果使我们能够用实验来检验这个理论。接近光速的炮弹对外力的抵抗，和理论所预料的一样吗？由于相对论在这一方面的叙述具有定量的性质，所以假如我们能实现炮弹的速度接近光速，就可以证实或推翻这个理论。

事实上，我们在自然界中确实可以找到具有这种速度的抛射体。放射性物质的原子，例如镭的原子，其作用等于大炮，能发射极大速度的射弹。我们不必详加叙述而只引用近代物理学和化学中的一个重要的观点。宇宙中所有的物质都是由为数不多的几种**基本粒子**组成的。犹如在一个城市中有大小不同、结构不同和建筑方法不同的建筑物，但是从小屋到摩天大楼都是用少数的几类砖头筑成的。同样，我们的物质世界中的所有已知化学元素，从最轻的氢起到最重的铀止，都是由同样几种砖头，即同样几种基本粒子所构成的。最重的元素或最复杂的建筑，是不巩固的，它们会分裂，或者按我们的说法，它们是具有放射性的。某些构成放射性物质的砖头，即基本粒子，有时会以接近光速的速度抛射出来。根据现在已被大量实验确认的见解，元素的原子，例如镭的原子，具有非常复杂的结构，而放射性蜕变只是证明原子是由比较简单的砖

头，即基本粒子构成的现象中的一种。

利用很巧妙而复杂的实验，我们可以发现这些粒子如何抵抗外力的作用。实验表明，这些粒子所产生的抗力与速度有关，恰如相对论所预见的一样。在许多其他的例子中，也可以发现抗力与速度有关，相对论与实验是完全相符的。这里我们又一次看到科学的创造性工作的重要特色：先由理论预言某些论据，然后由实验来确认它。

这个结果暗示着一个更为重要的推广。一个静止的物体有质量，但没有动能（运动的能量）。一个运动的物体既有质量又有动能。它比静止的物体更强烈地抵抗速度的改变。运动物体的动能好像增加了它的抵抗作用。假如两个物体有同样的静止质量，则有较大动能的一个对于外力作用的抗力也较强。

设想一个装着球的箱，箱与球在我们的坐标系中都是静止的。要使它运动，要增加它的速度，都需要一些力。假如球在箱中很快地、像气体的分子一样，以接近光速的平均速度朝各个方向运动，那么用相同的力在相同的时间间隔内是否能产生相同的速度的增加呢？现在必须用更大的力，因为球的动能的增加加强了箱的抵抗力。能，至少是动能阻止运动的作用和有重量的质量所起的作用是一样的。这对于所有各种能来说也都是对的吗？

相对论从它的基本假设出发，对这个问题推论出一个明白而确切的答案，而且是一个定量性质的答案：所有的能都会抵抗运动的改变；所有的能的行为都和物质的一样；一块铁在炽热时称起来比冷却时要重一些；从太阳发射出来的通过空间的辐射含有能，因此也有质量；太阳与所有发出辐射的星体，都由于发出辐射而失去质量。这个具有普遍性的结论是相对论的一个重要的成就，而且与所有经过考验的论据都相符合。

经典物理学介绍了两种物质：质与能。第一种有重量，而第二种是没有重量的。在经典物理学中，我们有两个守恒定律：一个是对于质的，另一个是对于能的。我们已经问过，现代物理学是否还保持着两种

物质和两个守恒定律的观点。答案是：否。根据相对论，在质量与能之间没有重要的区别。能具有质量，而质量代表着能量。现在只用一个守恒定律，即质量——能量守恒定律，而不用两个守恒定律了。这种新的观点在物理学的进一步发展中已被证明是很成功的。

为什么能是具有质量而质量又代表能量的这一论据，在过去一直没有被人注意到呢？一块热的铁称起来是不是会比一块冷铁重一些呢？现在对于这个问题的答案是“是的”，而过去（见“热是一种物质吗”一节）的答案是“不是的”。从那里开始到现在为止所讲的两个答案之间的一切内容自然还不足以解决这个矛盾。

我们在这里所遇到的困难和前面所遇到的困难是属于同一种性质的。相对论所预言的质量的变化是小到不能测量的程度，甚至最灵敏的天平也不能直接称出来。要证明能不是没有重量，可以用许多可靠但间接的方法来达成。

直接证据之所以缺乏，是因为物质与能之间的相互转换的兑换率太小了。能和质量的比较，犹如贬值的货币和高价值的货币相比较。举一个例子就可以把它弄清楚。能够把3万吨水变为蒸汽的热量称起来只有1克重。能之所以一直被认为是没有重量的，无非是因为它的质量太小了。

旧的能与物质之间的关系是相对论的第二个祭品。第一个祭品是传播光波的介质。

相对论的影响远远超过了由此兴起相对论的那个问题的范围。它扫除了场论的许多困难和矛盾，它建立了更普遍的力学定律，它用一个守恒定律来代替两个守恒定律，它改变了我们旧的绝对时间的概念。它的有效性不仅限于物理学的范围之内，它已成为网罗一切自然现象的普遍框架。

时——空连续区

“法国大革命于1789年7月14日在巴黎开始。”这句话说出了一个事件的空间和时间。对于一个初次听到这句话并不懂“巴黎”是什么意思的人，你可以告诉他：这是位于我们的地球上东经2°、北纬49°的一个城市。用这两个数就能够确定这个事件发生的地点，而“1789年7月14日”则是事件发生的时间。在物理学中，准确地表示一个事件发生的地点与时间比在历史中更重要，因为这些数据是定量描述的根本。

为简单起见，我们在前面只考察了直线运动。我们的坐标系是一根有起点而无终点的坚硬的杆。我们暂且保留这个限制。我们在杆上取不同的点；它们的位置都只能够用一个数来表示，即应用点的坐标。说一点的坐标是7.586英尺，就是说，它与杆的起点的距离为7.586英尺。反过来说，假如有人给我一个任意的数和一个量度单位，我总能够在杆上找到和这个数相对应的一点。我们可以说：杆上一个确定的点与每一个数相对应，而一个确定的数则与每一点相对应。对于这件事，数学家是用下面这个句子来表达的：杆上所有的点构成了一个**一维连续区**。在杆上的每一给定点的无论怎样近的地方都有一个点。我们在杆上可以用许多任意小的距离来把两个相距遥远的点连接起来。连接相距遥远的两点的各个距离可以任意小，这便是连续区的特征。

再举一个例子。假设有一个平面，你若喜欢以一件具体的东西为例，则假设有一个长方形的桌面（图58）。桌面上的一点的位置可以用两个数来表示，而不像前面那样只用一个数来表示。这两个数便是这个点与桌的两条相互垂直的边的距离。和平面上的每一点相对应的不是一个数，而是一对数：一个确定的点都有一对数跟它相对应。换句话说：平面是一个**二维连续区**。在平面上的每一给定点的无论怎样近的地方都有别的点。两个相距遥远的点可以用一根曲线分成的任意小的距离把它们连接起来。因此，用任意小的距离连接两个相距遥远的点，每一点都

可以用两个数来代表，这就是二维连续区的特征。

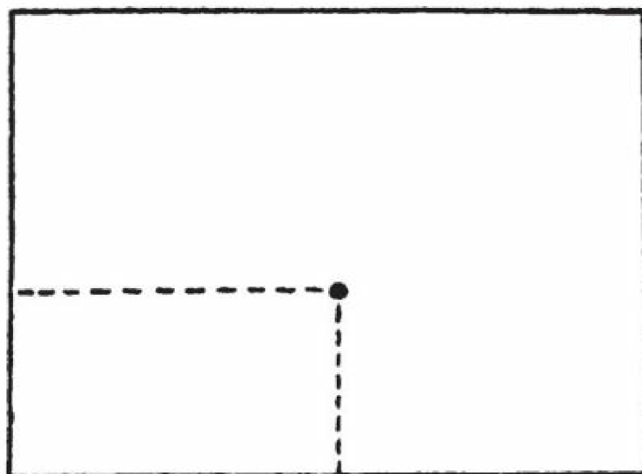


图58

再举一个例子。设想你要把你的房间看作你的坐标系。这就是你想关联于房间的墙来描述所有的位置。如果一盏灯是静止不动的，这盏灯的位置可以用三个数来表示（图59）：两个数决定它与两个相互垂直的墙的距离，而第三个数则决定它与天花板或地板的距离。三个确定的数与空间的每一点相对应，空间中一个确定的点与每三个数相对应。这可以用下面的一句话来表达：我们的空间是一个**三维连续区**。在空间的每一给定点的非常近的地方还存在着许多点。连接相距遥远的点的距离可以任意小，而每一个点都用三个数来代表，这就是三维连续区的特征。

但是，上面所讲的几乎都不是物理学。现在再回到物理学上来，我们必须考察物质粒子的运动。要观察并预言自然界中的现象，我们不仅应考察物理现象发生的位置，还要考察它发生的时间。我们再来举一个很简单的例子。

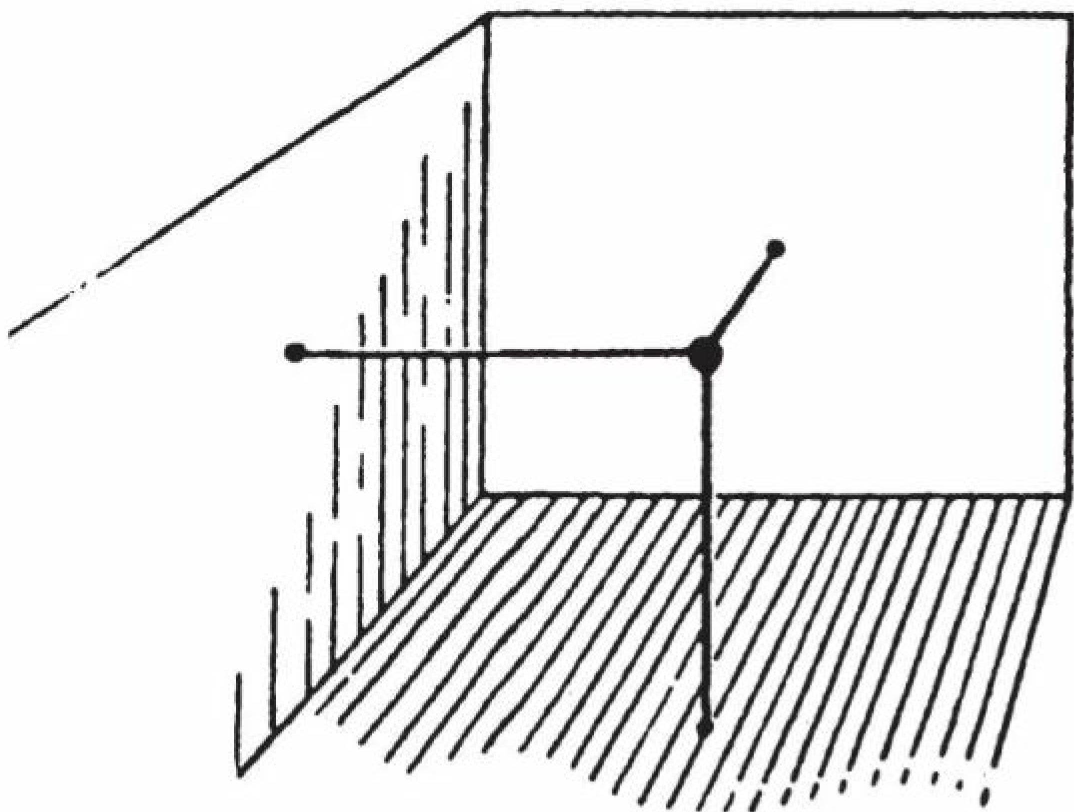


图59

一个小石子，现在把它看作一个粒子，从塔上落下来。假设塔高256英尺。从伽利略时代起，我们就能预言石子开始落下以后在任何时刻的坐标。下面是说明石子在0、1、2、3、4秒后的位置的“时间表”。

时 间（秒）	0	1	2	3	4
离地高度（英尺）	256	240	192	112	0

在我们的“时间表”中记载着五个事件，每一个事件用两个数，即每一个事件的时间和空间坐标来表示。第一个事件是石子在0秒时从离地256英尺处石子的下落。第二个事件是石子与我们坚硬的杆（塔）在离地240英尺处相重合，这发生在第1秒之后。最后的事件是石子与地面相

接。

我们可以用不同的方式来表示从这个“时间表”中所得到的知识。我们可以将“时间表”中的五对数字表示为平面上的五个点。首先确定一种比例尺。例如，像图60那样，一段线表示100英尺，而另一段线表示1秒。



图60

然后画两根垂直的线，把水平线作为时间轴，竖直线作为空间轴。我们立刻看到“时间表”可以用时——空平面中的五个点来表示（图61）。

离空间轴的距离代表“时间表”第一行中所指出的时间坐标，而离时间轴的距离则代表空间坐标。

用“时间表”来表示和用平面上的点来表示，方式虽然不同，但效果完全一样。每一种方式都可以根据另一种做出来。在这两种表示方式之中应选择哪一种，只不过是随人所好而已，因为实际上它们是等效的。

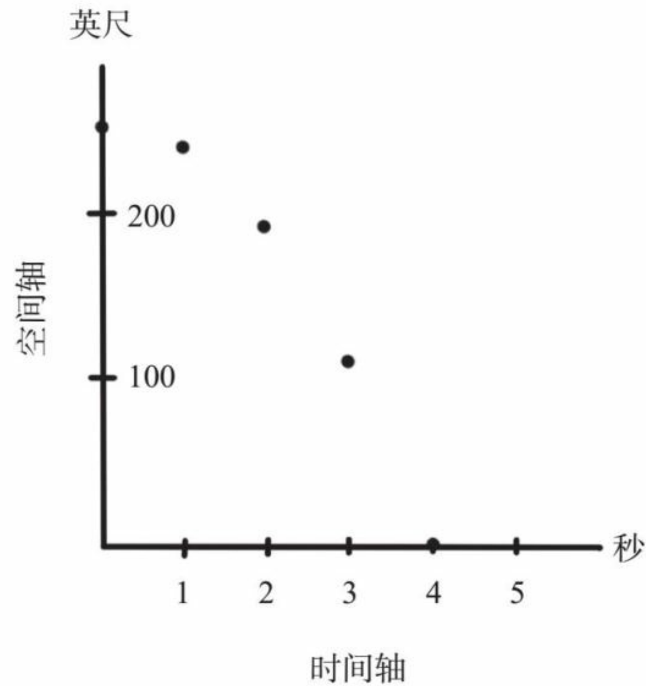


图61

让我们再前进一步。设想有一个更好的“时间表”，它不是记出每一秒的位置，而是记出每百分之一秒或千分之一秒的位置。这样在我们的时——空平面上便会有许多点。最后，如果对每一时刻记出位置，或者如数学家所说，把空间坐标表示为时间的函数，那么这些点的集合便成为一根连续的线。因此，像图62那样，这个图所代表的不是过去那样零碎的知识，而是石子运动的全部知识。

沿着坚硬的杆（塔）的运动，也就是在一维空间中的运动，在这里是用二维时——空连续区中的一根曲线来表示的。这个时——空连续区中的每一点都有一对数字和它对应。一个数表示时间坐标，另一个数表示空间坐标。反过来说，在我们的时——空连续区中的一个确定的点，与表示一个事件的某一对数字相对应。接邻的两个点代表在稍微不同的两个位置上以及在稍微不同的两个时刻分为两次发生的两个事件。

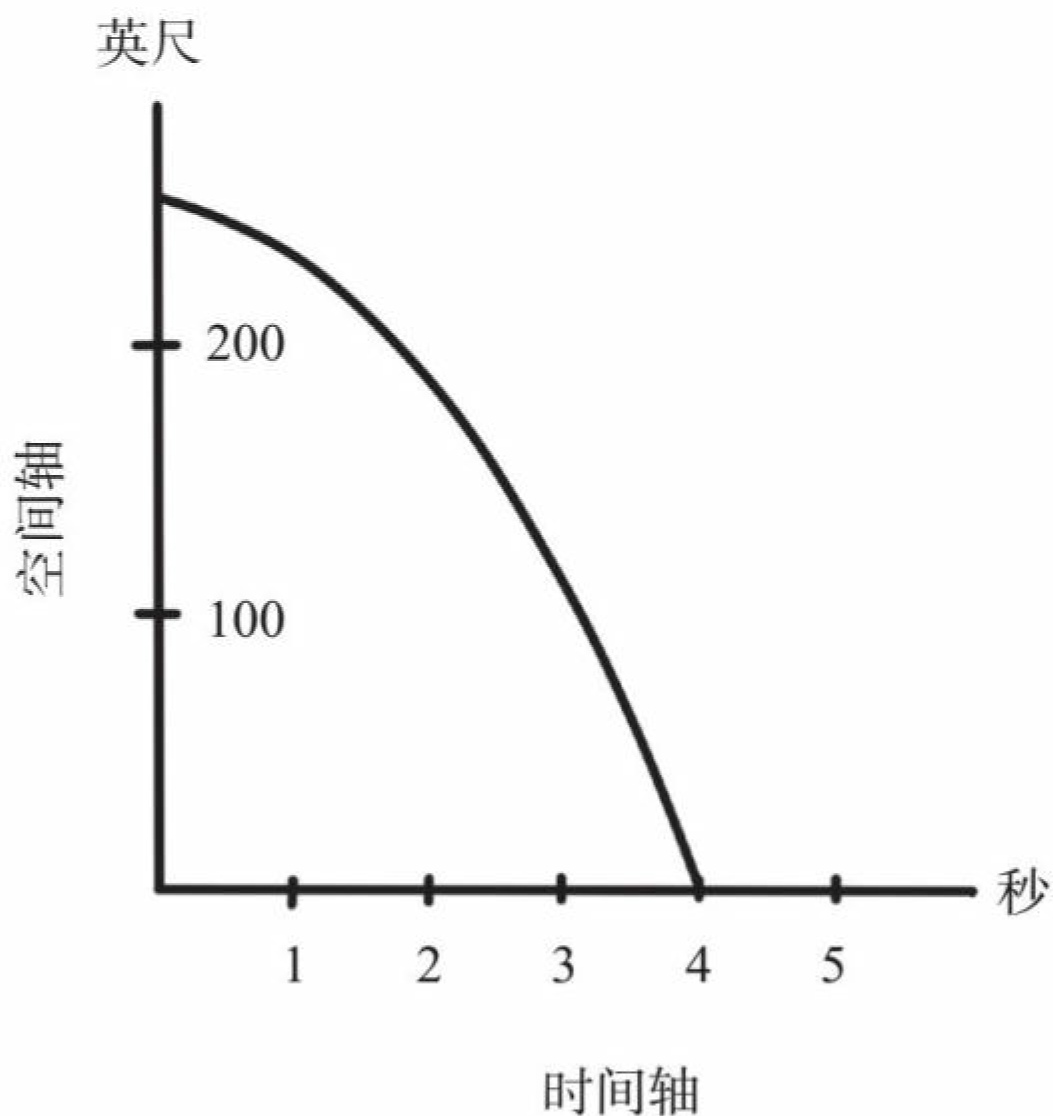


图62

你或许会用下面的理由来反对我们的图示法：用一段线来代表一个时间单位，把它机械地和空间联系起来，并由两个一维连续区构成一个二维连续区，这是毫无意义的。但是假如你要反对这个办法，那么便要同样有力地反对许多图示，例如表示去年夏季纽约城的温度变化的图、表示近几年来生活费用变化的图，因为这些例子中所用的都是同一种方法。在温度图中，一维的温度连续区和一维的时间连续区结合成一个二维的温度——时间连续区。

让我们再回到从256英尺高的塔上落下来的粒子的问题上。我们把运动画成图是一种很有用的办法，因为它表示在任何时刻粒子的位置。知道了粒子是怎样运动的，我们就能再一次把它的运动画出图来。我们可以用两种不同的方式。

我们记得一种粒子在一维空间中随时间而变化的图。我们把运动画成在一维连续区中连续发生的一系列事件。我们不曾把时间和空间结合起来。我们所用的是**动图**；在这个图中，位置随时间而**变化**。

但是我们可以把同样的运动用不同的方式加以描述。我们可以把运动考虑为二维时——空连续区中的曲线而构成一幅**静图**，现在运动已经由某种东西来代表，它**是**存在于二维时——空连续区中的**某**种东西，而不是在一维空间连续区中变化的某种东西。

但是这两个图是完全等效的，爱用这一种或那一种只不过是随人们的习惯与兴趣而已。

以上关于运动的这两种图示法所说的一切都与相对论没有任何关系。两种图示法都可以随便被使用，不过经典物理学比较喜欢用动图，因为动图把运动描绘成空间中所发生的事件，而不是作为存在于时——空中的某种东西。但是，相对论改变了这个观点。它明确地赞成静图，它发现把运动表示为存在于时——空中的某种东西的这个图示法，是关于描述实在的一幅更方便、更客观的图。我们还要回答一个问题：为什么这两张图从经典物理学的观点看来是等效的，而从相对论的观点看来却不是等效的呢？

要明了这个问题的答案，必须再讨论相互做匀速直线运动的两个坐标系。

根据经典物理学，在两个相互做匀速直线运动的坐标系中的观察者对于同一个事件，将选用各自不同的空间坐标，但只用同一个时间坐标。所以在上述例子中，石子和地面接触是用我们所选定的坐标系中的时间坐标“4”和空间坐标“0”来表示的。根据经典力学，相对于我们选定

的坐标系做匀速直线运动的一个观察者也会认为石子在4秒之后碰到地面。但是这个观察者却会把距离与他自己的坐标系相联系，而且一般说来，会把不同的空间坐标和石子碰地的事件联系起来，不过他所用的时间坐标跟所有相互做匀速直线运动的其他观察者所用的都是相同的。经典物理学只知道对所有的观察者都是同样流逝的“绝对的”时间。对于每一个坐标系，二维连续区都可以被分解为两个一维连续区：时间与空间。由于时间的“绝对的”性质，在经典物理学中把运动的图从“静图”过渡到“动图”便具有一种客观的意义了。

但是，我们已经确信经典转换不能被普遍地应用于物理学中。从实用的观点看来，它还可以适用于小的速度，但是绝不适用于解决根本的物理问题。

根据相对论，石子跟地面相碰的时间在所有的观察者看来不会是一样的。在两个不同的坐标系中，时间坐标和空间坐标都是不相同的，并且如果两个坐标系的相对速度接近光速，则时间坐标的变化将十分明显。二维连续区不能像在经典物理学中那样被分解为两个一维连续区。在决定另一个坐标系中的时——空坐标时，我们不能把空间和时间分开来考察。从相对论的观点看来，把二维连续区分解为两个一维连续区，似乎是一种没有客观意义的武断的方法。

刚才我们所讲的一切都不难把它推广到非直线运动的情况中。事实上，要描述自然界中的现象，必须用四个数而不是用两个数。从物体及其运动而想到的我们的外在空间具有三个维度，而物体的位置是由三个数来表示的。一个事件的时刻是第四个数。四个确定的数对应于每一个事件，每个确定的事件都有四个数跟它相对应。因此，所有的事件构成一个**四维连续区**。这一点没有什么神秘之处，上面这句话无论对经典物理学或相对论来说都是同样正确的。但是当我们考察两个相互做匀速直线运动的坐标系时，就又会发现差异。倘若一个房间在运动，房间内、外的观察者要测定同一个事件的时——空坐标。经典物理学家们又会把这个四维连续区分解为三维空间和一维时间连续区。老派物理学家只考

虑空间的转换，因为对他们来说，时间是绝对的。他们觉得把四维世界连续区分解为空间和时间是自然而方便的。但是从相对论的观点看来，时间和空间从一个坐标系过渡到另一个坐标系时都是要改变的，而洛仑兹转换就是考察事件的四维世界的四维时——空连续区的转换性质的。

所有的事件都可以被描绘成随时间变化而且投射在三维空间的背景上的动图。但是它们也可以直接被描绘成投射在四维时空连续区的背景上的静图。从经典物理学的观点看来，这两个图—— 一个动的，一个静的，都是等效的。但是从相对论的观点看来，静图比较方便，而且更符合客观实际。

甚至在相对论中，如果我们喜欢，还是可以用动图的。但是我们必须记住，这样把时间和空间分开来，是没有客观意义的，因为时间不再是“绝对”的了。我们以后还是要用“动”的语言而不用“静”的语言，不过我们得时常记住它的局限性。

广义相对论

现在还有一个论点等待我们去澄清。有一个最基本的问题尚未解决：是不是存在着一个惯性系呢？我们对于自然界的定律，对于它们对洛仑兹转换的不变性，以及对于它们在所有互做匀速直线运动的惯性系中的有效性都已略有所知。我们有了定律，但是还不知道它们所参照的是哪一个框架。

为了使我们更加明白这个问题的困难性，让我们采访一位经典物理学家，问他几个简单的问题：

“惯性系是什么？”

“它是力学定律在其中行之有效的一个坐标系。在这样一个坐标系

中，一个没有受外力作用的物体总是做匀速直线运动。这种性质使我们能把惯性坐标系和其他任何坐标系区别开来。”

“但是所谓没有力作用于物体上，究竟是什么意思呢？”

“这只是说物体在惯性坐标系中做匀速直线运动。”

于是我们又可以再问一次：“惯性坐标系是什么？”但是由于很少有希望得到一个与上面不同的答案，我们不如把问题改变一下，或许可以得到一些具体的知识：

“一个严密地与地球相结合的坐标系是一个惯性坐标系吗？”

“不是，因为地球的转动，力学定律在地球上不是严格地有效的。在许多问题上，我们可以把严密地结合于太阳的坐标系看作一个惯性系；但是我们有时也说到太阳的转动，可见严密地结合于太阳的坐标系，严格地说也不是一个惯性坐标系。”

“那么，具体地说，什么才是你的惯性坐标系呢？而且怎样选择它的运动状态呢？”

“这只是一个有用的虚构，我也想不到怎样去实现它。只要我能够远离一切物体，而且使我不受任何外力的影响，我的坐标系就会是惯性的。”

“但是你所谓免除所有的外界影响的坐标系又是什么意思呢？”

“我的意思是说那个坐标系是惯性的。”

于是，我们又回到原来的问题上来了。

我们的谈话显示出经典物理学中一个严重的困难。我们有定律，但是不知它们归属于哪一个框架，因此整个物理学都好像是筑在沙堆上一样。

我们可以从另一种不同的观点来研究这个困难。设想在全宇宙中只有一个物体，它构成了我们的坐标系。这个物体开始转动。根据经典力

学，转动的物体的物理定律跟不转动的物体的物理定律是不同的。假使惯性原理在一种情况中是可用的，那么在另一种情况中便是不可用的。但是这些话听起来很令人怀疑。假使整个宇宙中只有一个物体，我们难道能够考察它的运动吗？所谓一个物体在运动，总是说它相对于另一个物体的位置改变。因此，说成独一无二的物体的运动是与常识不符的。在这一点上，经典物理学和常识非常矛盾。牛顿的说法是：假使惯性定律是有效的，那么这个坐标系或者是静止，或者是做匀速直线运动。如果惯性定律无效，那么物体的运动是非匀速运动。这样一来，我们对运动或静止的判断，便要依靠所有的物理定律能否在既定的一个坐标系里面应用来决定了。

取定两个物体，例如太阳和地球。我们所观察到的运动也是**相对的**。既可以用关联于地球的坐标系，也可以用关联于太阳的坐标系来描写它。从这个观点来看，哥白尼的伟大成就在于把坐标系从地球转换到太阳上去。但是因为运动是相对的，任何参考系都可以用，似乎没有什么理由认为一个坐标系会比另外一个好些。

物理学再一次干涉和改变了我们的常识。关联于太阳的坐标系比关联于地球的坐标系更像一个惯性系。物理定律在哥白尼的坐标系中比在托勒密的坐标系中要好得多。只有在物理学的观点上才能对哥白尼发现的伟大意义有所体会。它说明了用严密地联结于太阳的坐标系来描写行星的运动有很大好处。

在经典物理学中，不存在绝对的匀速直线运动。如果两个坐标系相互做匀速直线运动，那么说“这个坐标系是静止的，而另一个是运动的”是毫无意义的。但是如果两个坐标系相互做非匀速非直线运动，那么完全有理由说：“这个物体在运动，而另一个是静止的（或者在做匀速直线运动）。”绝对的运动在这里有很确切的意义。在这一点上，常识和经典物理学之间隔着一条鸿沟。前面所说的惯性系的困难是和绝对运动的困难密切相关的。绝对运动之所以成为可能，是因为自然定律适用的惯性系统的观念。

这些困难好像是无法避免的，正像任何物理学理论都无法避免它们一样。困难的根源在于自然定律只能被应用在某一种特殊的坐标系，即惯性系中。解决这个困难有无可能，全看对于下面的问题怎样回答。我们是否能这样来表达物理学中的定律，使它们在所有的坐标系中，即不单是在相互做匀速直线运动的系统中，而且在相互做任何任意运动的坐标系中都是有效的呢？如果这是可以做到的，那么困难便会得到解决。那时，我们便可以把自然定律应用到任何一个坐标系中去。于是，在科学早期的托勒密和哥白尼的观点之间的激烈斗争，也就会变得毫无意义了。我们应用任何一个坐标系都一样。“太阳静止，地球在运动”，或“太阳在运动，地球静止”，这两句话，便只是对两个不同坐标系的两种不同习惯的说法而已。

我们是否能够建立起一种在所有的坐标系中都有效的名副其实的相对论物理学呢？或者说，能否建立一种只有相对运动而没有绝对运动的物理学呢？事实上，这是可能的！

关于怎样去建立这种新物理学，我们至少已经有了一个启发，尽管这个启发是那样软弱无力。真正的相对论物理学必须能应用于一切坐标系中，因此也必须能应用于惯性坐标系的特例中。我们早已知道能应用于惯性坐标系的许多定律。适用于一切坐标系的新的普遍定律，必须在惯性系的特例中还原为旧的已知定律。

建立能应用于一切坐标系的物理学定律的问题，已经被所谓**广义相对论**解决了；先前所讲的相对论，只能应用于惯性系，被称为**狭义相对论**。这两种相对论自然不能相互矛盾，因为我们必须一直把狭义相对论中的旧定律包含在应用惯性系的普通定律中。但是正由于物理学定律以往只建立在唯一的惯性坐标系上，现在它将成为一种特殊的极限情况，因为在广义相对论中，一切相对做任意运动的坐标系都是许可的。

这就是广义相对论的纲领。但是要描写这个纲领是怎样做出来的，我们必须说得比以前更含糊些。科学发展上所产生的新困难迫使我们的理论愈来愈抽象。许多预料不到的事情仍然等待着我们去发现，而我们

的最终目的总是要更好地了解实在。在结合理论和观察的逻辑链条上又增加了新的一环。要清除由理论通到实验的道路上的一切不必要的和牵强的假设，要使理论包括范围日益广阔的论据，必须使这个链条愈来愈长。我们的假设变得愈简单、愈根本，我们所用的数学推理工具便愈艰深，而由理论到观察的道路也愈长、愈艰难、愈复杂。虽然这些话听来好像不通，但我们一定可以说：新物理学比旧物理学更简单，因而也似乎更困难而且更艰深。我们的外在世界的图景愈简单，它所包括的论据愈多，它愈能在我们的脑海中鲜明地反映出宇宙的融合与一致。

我们的新观念是很简单的：建立一种在所有的坐标系中都有效的物理学。为了满足这个观念，我们不能不使物理学的形式更复杂，并且不能不使用一些我们以前在物理学中没有用过的数学工具。在这里，我们只指出这个预言的应验和两个主要问题（引力及几何学）的关系。

在升降机外和升降机内

惯性定律标志着物理学上的第一个大进步，事实上它是物理学的真正开端。它是由考虑一个既没有摩擦又没有任何外力作用而永远运动的物体的理想实验而得来的。从这个例子以及后来许多别的例子中，我们认识到用思维来创造理想实验的重要性。现在我们又要讨论到另一些理想实验。虽然这些理想实验听来似乎很荒唐，可是用这些简单的方法却能帮助我们了解相对论。

前面讲过一个做匀速直线运动的房间的理想实验。这里我们要变换一下，讲一个下降的升降机的理想实验。

设想有一个大的升降机在摩天大楼的顶上，而这个理想的摩天大楼比任何真实的摩天大楼还要高得多。突然，升降机的钢缆断了，于是升降机毫无拘束地向地面降落。在降落的过程中，里面的观察者正在做实

验。描述这些实验的时候，我们不必顾虑空气的阻力或摩擦力，因为在理想实验中，我们可以不考虑它的存在。一个观察者从袋里拿出一块手帕和一只表，然后让它们从手上掉下来。这两个物体会怎样呢？在升降机外面的观察者从升降机的窗子望去，发现手帕和表以同样的加速度向地面落下。我们记得，一个落体的加速度与它的质量无关，而这个情况正揭示了引力质量和惯性质量的相等。我们还记得，从经典力学的观点看来，这两种质量的相等完全是偶然的，它在经典力学中毫无作用。可是在这里，这两种质量的相等是很重要的，它反映了一切落体都有相同的加速度，并且构成了我们全部论证的基础。

我们回过头来谈下落的手帕和表：在升降机外面的观察者看来，这两个物体是以同样的加速度降落。而升降机连同它的四壁、地板、天花板也都以同样的加速度降落。因此，两个物体与地板之间的距离不会改变。对于升降机里面的观察者来说，这两个物体就停在他松手让它们掉下的那个地方。里面的观察者可以不管引力场，因为引力场的源在他的坐标系之外。他发现在升降机之内没有任何力作用于这两个物体，因此它们是静止的，正好像它们是在一个惯性坐标系中一样。奇怪的事情在升降机中发生了！假使这个观察者把一个物体朝任何方向（例如朝上或朝下）推动，在它没有碰到升降机的天花板或地板之前，它就会永远匀速直线地运动。简单说来，升降机里面的观察者认为经典力学的定律是有效的。所有物体的行为都被惯性定律预料到了。这个新的严密地联结于自由降落的升降机的坐标系跟惯性坐标系之间只有一个方面不同。在惯性坐标系中，一个没有受任何力作用的运动物体永远会匀速、直线地运动。经典物理学表述惯性坐标系是无论在空间上与时间上都不加限制的。可是在这个升降机中的观察者的例子中就不同了。他的坐标系的惯性的性质，却是被限制在一定的空间与时间中的。这个直线匀速地运动的物体迟早要碰到升降机的壁，而匀速直线运动就受到破坏。而且整个升降机迟早会碰到地面，而连里面的观察者和他的实验都要受到破坏。这个坐标系只是一个实在的惯性坐标系的“袖珍版”罢了。

这个坐标系的局部性是很重要的。如果这个想象中的升降机的一端

在北极，一端在赤道，而手帕放在北极，表放在赤道，则在外面的观察者看来，这两个物体的加速度不会相等；它们不会是相对地静止的。我们的全部推论便都瓦解了！升降机的尺度必须有一定的限制，然后才能认为一切物体的加速度相对于升降机外面的观察者都相等。

虽然有了这种限制，里面的观察者还是认为这个坐标系具有惯性的性质。我们至少能指出一个所有的物理学定律在它里面都能应用的坐标系，不过在时间和空间上受限制而已。假如我们再想象另一个坐标系，即另一个对自由降落的升降机做直线匀速运动的升降机，那么这两个坐标系都会是局部惯性的。所有的定律在这两个坐标系中都完全一样。从一个坐标系过渡到另一个坐标系是用洛仑兹变换来表示的。

我们试看升降机里面和外面的这两个观察者用什么方法来描述升降机里面所发生的事情。

外面的观察者看到升降机的运动和机内一切物体的运动，发现它们与牛顿引力定律是一致的。在他看来，由于地球的引力场的作用，运动不是直线匀速的，而是加速的。

可是在升降机内出生和成长起来的一代物理学家，却会有完全不同的想法。他们确信自己保有一个惯性系统，而把所有的自然定律都关联到他们的升降机，而且很有信心地说，在他们的坐标系中，定律都有一种特别简单的形式。他们会很自然地认为他们的升降机是静止的，而他们的坐标系是惯性的。

要调解外面的观察者和里面的观察者的分歧意见是不可能的。他们每人都有权利把一切现象联系到自己的坐标系上去。两者都可以把现象描述得完全一致。

从这个例子中可以看到，甚至在两个并非相对做直线匀速运动的坐标系中的物理现象要做出一致的描述也是可能的。但是要做这样的描写，我们必须把引力考虑在内，它构成了从一个坐标系过渡到另一个的“桥梁”。外面的观察者认为存在引力场，里面的观察者却认为不存

在。外面的观察者认为存在升降机在引力场中的加速运动，里面的观察者却认为升降机是静止的，而且引力场也是不存在的。但是引力场这个“桥梁”，使两个坐标系中的描写成为可能，这个桥梁架设在一个很重要的礅柱之上：引力质量和惯性质量的相等。如果没有这个经典力学未曾注意到的线索，我们目前的论证就会完全失败。

现在再来讲一个稍微不同的理想实验。假设有一个惯性坐标系，在它里面，惯性定律是有效的。我们已经描写过静止在这样一个惯性坐标系中的一个升降机中所发生的事。现在我们把图改变一下。有人在外面把一根缆索缚在升降机上，再以一个不变的力照图上的方向拉（图63）。至于用什么方法拉是无关紧要的。因为力学定律在这个坐标系中是有效的，整个升降机以不变的加速度朝着一个方向运动。我们再听一听升降机内外的观察者怎样解释在升降机里面所发生的现象。

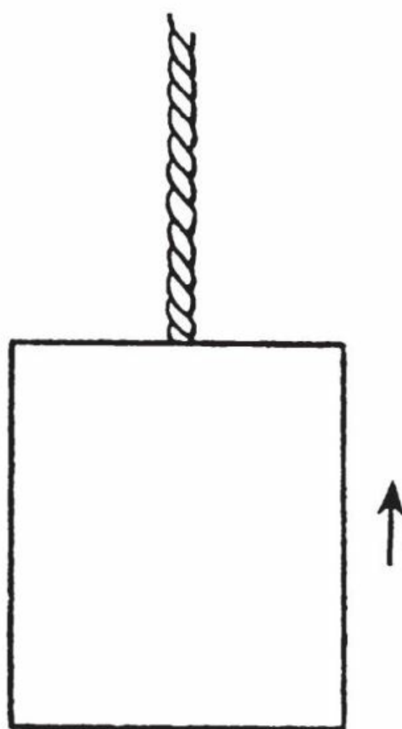


图63

外面的观察者：我的坐标系是一个惯性坐标系。升降机以不变的加速度运动是因为有一个不变的力在作用。里面的观察者是在做绝对运

动，力学定律对于他是无效的。他看不出不受外力作用的物体是静止的。如果释放一个物体，那么它立刻会碰在升降机的地板上，因为地板是朝着物体向上运动的。表和手帕也完全一样。我觉得很奇怪，升降机内的观察者的脚必须永远贴在“地板”上，因为当他跳起来的时候，地板又立刻会重新碰到他。

里面的观察者：我不知道有什么理由可以相信我的升降机在做绝对运动。我同意，跟我的升降机紧密地联系着的坐标系不是惯性的，但是我不相信它与绝对运动有关。我的表、手帕以及一切物体的下降，是整个升降机都是在引力场中的缘故。我所观察到的运动和人们在地球上所看到的完全一样。人们很简单地用引力场的作用来解释地球上的物体下落的运动。我也是如此。

这两种描述（一种是由外面的观察者所做，另一种是由里面的观察者所做）都很能自圆其说，因而我们不可能决定哪一个是正确的。我们可以采用其中任何一种来描写升降机中的现象：或是依照外面的观察者所主张的，升降机做非匀速直线运动而没有引力场；或者依照里面的观察者所主张的，升降机静止，却有引力场。

外面的观察者可以认定升降机是在做“绝对的”非匀速直线运动。但是，一个被作用重力场假设抵消的运动不能被视为绝对运动。

也许我们能从这两种不同描述中的含糊的地方找到一条出路而决定哪一种对，哪一种不对。设想有一束光穿过一个侧面窗口水平地射进升降机内，并且在极短时间之后射到对面的墙上。我们再看这两个观察者怎样预言光的路径。

外面的观察者由于相信升降机在做加速运动，他断定：光线射进窗内之后是水平地以不变的速度沿着直线向对面的墙上射的。但是升降机正在朝上运动，而在光朝墙而射的时间内，升降机已经改变了位置。因此光线所射到的点不会与入口的点恰恰相对，而会稍微低一点（图64）。这个差异是很小的，可是总是有的，而相对于升降机而言，光线不是沿着直线，而是沿着稍微弯曲的曲线行进的。产生差异的原因是：

当光线经过升降机内部时，升降机本身已移动了一段距离。

里面的观察者由于相信升降机内的一切物体都受到引力场的作用，他说：升降机的加速运动是没有的，只有引力场的作用。光束是没有重量的，因此不会受到引力场的影响。假如它是朝着水平的方向射去，它就会射到与入口的点恰恰相对的一点上。

从这个讨论来看，似乎有可能在这两种相互矛盾的观点中选择一种，因为这两个观察者对于同一个现象的解释是不同的。假使刚才所指出的两种解释都没有什么不合理的地方，那么我们前面的全部论证都会受到破坏，我们就不能用两个并立的方法—— 一种用引力场，另一种不用引力场，来描述一切现象。

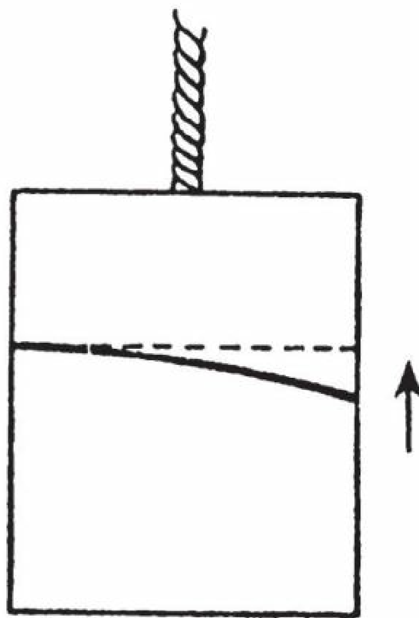


图64

但是幸好里面的观察者的推理中有一个严重的错误，才挽救了我们前面的结论。他说："光束是没有重量的，因此不会受到引力场的影响。"这是不正确的！光束具有能，而能具有质量；但是任何惯性质量都受引力场的吸引，因为惯性质量和重力质量是相等的。一束光在引力场中会弯曲，正如以等于光速的速度水平地抛出的物体的路线会弯曲一样。假如里面的观察者做出正确的推理，他把光线在引力场中弯曲的事

实考虑进去，那么他的结果会与外面的观察者的结果完全一致。

地球的引力场对于使光线弯曲的力自然是太弱了，不能用实验直接证明光线在地球引力场中的弯曲。但是在日食时所完成的著名实验虽然是间接的，却确实地证明了引力场对光线路径的影响。

从这些例子中可以看出，要建立一种相对论物理学是很有希望的。但是要这样做，我们必须首先扭住引力问题。

在升降机的例子中，我们已经看到两种描述的并立性。可以假定非匀速运动，也可以不假定。我们可以用引力场来从这些例子中排斥“绝对的”运动。但是那样一来，非匀速运动就一点也不绝对了。引力场能够把它完全抹去。

我们可以把绝对运动和惯性坐标系的鬼魂从物理学中赶出去，建立一个新的相对论物理学。我们的理想实验指出广义相对论的问题怎样和引力问题有密切的关系，并且指出为什么引力质量和惯性质量的相等对这一关系如此重要。很明显，广义相对论中的引力问题的解和牛顿的解一定是不同的。引力定律，正像所有的自然定律一样，必须对所有可能的坐标系都能成立，而牛顿提出的经典力学定律只有在惯性坐标系中才是有效的。

几何学与实验

下面一个例子比下落的升降机的例子还要奇特。我们必须接触到一个新的问题：广义相对论与几何学之间的关系。我们先来描述一个另外的世界，在那里面生存着二维的生物，而不是像我们的世界里那样生存着三维的生物。电影已经使我们习惯于感受在二维银幕上演出的二维生物。我们现在设想银幕上的这些影子（出场人物）是实际存在的，他们

有思维的能力，能创造他们自己的科学，二维的银幕就是他们的几何空间。这些生物不能具体地想象一个三维空间，正如我们不能想象一个四维世界一样。他们能够折转一根直线，知道圆是什么，但是不能做一个球，因为这就等于丢弃了他们的二维银幕。我们的处境也与之类似。我们能够把线和面折转和弯曲过来，但是我们很难想象一个折转或弯曲的三维空间。

这些影子通过生活、思维和实验，最后可以精通二维欧几里得几何学的知识。因此，他们能证明三角形的内角之和为180°。他们能够做出有公共圆心的一大一小的两个圆。他们会发现，两个这样的圆的圆周之比等于它们的半径之比，这种结果正是欧几里得几何学的特征。如果银幕无限大，这些影子会发现，若笔直往前旅行，他们永远也不会回到起点。

现在，我们想象这些二维生物的环境改变了。我们再想象有人从外面，即从“第三维”，把他们从银幕上迁移到具有很大半径的圆球上。假如这些影子比起全部球面来是极小的，假如他们无法做遥远的通信，又不能走动得很远，则他们不会感觉到有什么变化。小三角形的内角之和仍是180°。具有共同圆心的两个小圆，其半径之比仍等于其周长之比。他们沿着直线旅行，还是不会回到他们的起点。

但是假设这些影子慢慢发展起他们的理论和技术知识。假使他们有了交通工具，能够很快地通过巨大的距离，他们便会发现，笔直往前旅行，最后还会回到他们的起点。“笔直往前”就是沿着圆球的巨大圆周走去。他们也会发现，具有公共中心的两个圆，假如一个半径很小，另一个很大，则其周长之比不等于其半径之比。

假如我们的二维生物是保守的，假如他们在过去几代所学的都是欧几里得几何学，那时候他们不能往远处旅行，那时候这种几何学跟观察到的情况是相符的，那么，尽管他们在测量上有明显的误差，他们也必然要尽可能去维护这种几何学。他们力求使物理学来挑起这些矛盾的重担。他们想寻找一些物理学上的理由，例如温度之差来解释线的变形，

说这种变形使测量结果与欧几里得几何学不符了。但是他们迟早总会发现，有一种更合理、更确切的方法来描写这些现象。他们最后会懂得他们的世界是有限的，还有跟他们所学的有很大不同的几何学原理。他们即使没有能力想象这些原理，也会知道，他们的世界是一个圆球上的二维表面。他们将很快地去学新的几何学原理，这些原理虽与欧几里得的不同，但是对他们的二维世界仍然是一致的、合乎逻辑的。下一代的二维生物便学到圆球的几何学知识，他们会觉得旧的欧几里得几何学似乎更复杂和牵强，因为它与观察到的情况不符。

我们再回到我们的世界中的三维生物上来。

说我们的三维空间具有欧几里得性，这是什么意思呢？这句话的意思是说所有欧几里得几何学中理论上证明了的命题，都能够用实际的实验加以证明。我们能够利用坚硬的物体或光线做出符合欧几里得几何学中的理想形体的实际形体。一把尺的边缘或一束光相当于一条线。用很细的坚硬的杆所构成的三角形的内角之和等于180°。用两根很细的弹性金属线所构成的同心圆的半径之比等于其周长之比。欧几里得几何学用这个方式来解释以后，便成了物理学的一章，不过这是很简单的一章。

但是我们可以认为矛盾已经找到了：例如由杆（有许多理由都认为它们是坚硬的）构成的大三角的内角之和不再等于180°了。因为我们已经习惯于用坚硬的物体来具体表示欧几里得几何学的观念，那么我们也许要寻找一些物理的力来解释我们的杆的这种意料不到的变形。我们力求发现这种力的物理性质，以及它对其他现象的影响。要挽救欧几里得几何学，我们会归罪于实际形体的不坚硬，会归罪于实际形体与欧几里得几何学中的形体不完全相符。我们要设法寻找一种更好的物体，它表现得和欧几里得几何学所期望的完全一致。可是，假如我们不能把欧几里得几何学和物理学结合成一个简单一致的图景，那么我们必须放弃关于我们的空间是欧几里得性的观念，并且要将我们的空间的几何性质做更普遍的假设，以便寻求更确切的“实在”的图景。

这个必要性可以用一个理想实验加以说明。这个实验告诉我们，一

个真正的相对论物理学不能建筑在欧几里得几何学的基础上。我们的论证要引用我们已经知道的惯性坐标系和狭义相对论的结果。

设想一个大圆盘，上面画着两个同心圆；一个很小，另一个非常大。圆盘很快地旋转。圆盘是相对于外面的观察者转动的，假设圆盘里面还有一个观察者。我们再假定外面的观察者的坐标系是惯性的。外面的观察者也可以在他的惯性坐标系中画出同样一大一小的两个圆，这两个圆在他的坐标系中是静止的，但与圆盘上的圆相重合。他的坐标系是惯性的，因此欧几里得几何学在他的坐标系中是有效的，他会发现两圆周之比等于其半径之比。但是在圆盘上的观察者又发现了什么呢？从经典物理学和狭义相对论的观点看来，他的坐标系是被禁用的。但是假如我们想为物理学定律找出能适用于任何坐标系的新形式，那么我们必须以同样严肃的态度来对待圆盘上和圆盘外的观察者。现在我们是从外面来注视圆盘里面的观察者，看他如何靠测量去寻找旋转的盘上的周长与半径。他所用的小尺，与外面的观察者所用的是一样的。所谓“一样的”，是指实实在在一样的，就是说它是由外面的观察者交给里面的观察者的，或者说，它是在一个静止的坐标系中长度相同的两把尺中的一把。

里面的观察者在盘上开始测量小圆的半径与周长。他的结果一定与外面的观察者的完全一样。圆盘围绕着它旋转的轴通过圆盘的中心。圆盘上接近于中心的那些部分的速度非常小。如果圆足够小，那么我们完全可以放心地使用经典物理学而不必顾及狭义相对论。这就是说，对于里面的和外面的观察者来说，尺的长度是一样的，因而对这两个观察者来说，两种测量的结果是一样的。现在盘上的观察者又来测量大圆的半径。放在半径上的尺相对于外面的观察者是在运动的。但是因为运动的方向跟尺垂直，这样尺是不收缩的，因而对两个观察者来说，它的长度是一样的。这样，对这两个观察者来说，三种测量结果是相同的：两个半径和一个小圆的圆周。但是第四种测量则不然。两个观察者所测的大圆的周长是不相同的，放在圆周上的尺朝着运动的方向，因此依照外面的观察者的观测，比起他的静止的尺来，现在它显得收缩了。外圆的速

度较内圆的大得多，因而必须计及这种收缩。因此如果应用狭义相对论的结果，我们的结论应该是这样的：两个测量者所测量的大圆的周长一定是不同的。由于两个观察者所测量的四种长度中只有一种是互不相同的，因此里面的观察者不能和外面的观察者一样认为两半径之比等于两圆周之比。这就是说，在盘上的观察者不可能在他的坐标系中确认欧几里得几何学的有效性。

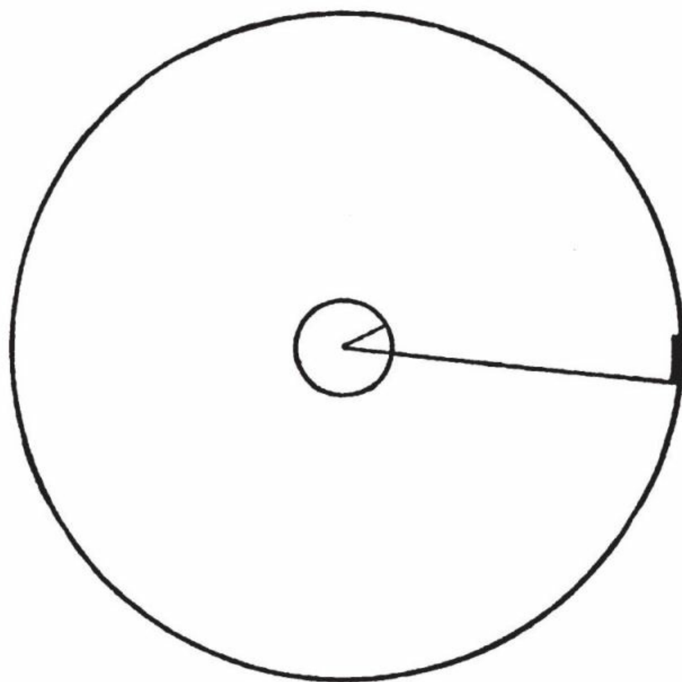


图65

圆盘上的观察者得到这种结果以后，还可以说他不想去考察不能应用欧几里得几何学的坐标系。欧几里得几何学之所以崩溃，是因为绝对转动，是因为他的坐标系是坏的和被禁止的。但是在这个论证中，他已经拒绝了广义相对论中的主要观念。另一方面，如果我们拒绝绝对运动的观念而保持广义相对论的观念，那么物理学就必须建立在比欧几里得几何学更普遍的一种几何学的基础上。假如所有的坐标系都是可以允许的，便无法逃避这个结局。

广义相对论所引起的变化，不能只局限于空间一方面。在狭义相对论中静止在一个坐标系中的许多钟，步调相同而且是同步的，就是说同

时指示相同的时刻。在一个非惯性的坐标系中的钟会怎样呢？前面的圆盘的理想实验又用得着了。外面的观察者在他的惯性坐标系中有步调完全相同，并且是同步的许多完好的钟。里面的观察者从这同类的钟里拿出两只，一只放在小的内圆上，另一只放在大的外圆上。内圆上的钟，相对于外面的观察者以很小的速度在运动。因此我们可以放心地断定，它的步调和圆盘以外的钟相同。但是大圆上的钟有很大的速度，和外面观察者的钟比较起来，步调变了，因此和放在小圆上的钟比较起来，步调也变了。因此，两只旋转的钟就有了不同的步调，而且，应用狭义相对论的结果，又发现我们在旋转的坐标系中不能把钟安置得和惯性坐标系中所安置的那样。

为了使我们可以明白从这个理想实验中和前面所描写的理想实验中究竟能够得出怎样的结论，不妨再引用信奉经典物理学的老派物理学家（古）和懂得广义相对论的现代物理学家（今）之间的一次对话。老派物理学家是站在惯性坐标系中的外面的观察者，而现代物理学家站在旋转的圆盘上。

古：在您的坐标系中，欧几里得几何学是无效的。我观察了您的测量，我承认在您的坐标系中，两个圆周之比不等于两个半径之比。这正表示您的坐标系是被禁用的。可是我的坐标系是惯性的，我能够放心地应用欧几里得几何学。您的圆盘在做绝对运动，而根据经典物理学的观点，它是一个被禁用的坐标系，在它里面，力学定律是无效的。

今：我不愿意听取任何关于绝对运动的说法。我的坐标系和您的一样好。我看见您对我的圆盘在旋转。没有人能够禁止我把一切运动都关联于我的圆盘。

古：但是您不觉得有一种奇怪的力使您离开圆盘的中央吗？假如您的圆盘不是一个很快地旋转着的旋转木马，那么您所观察到的两种情况一定不会发生。您不会注意到有一种力把您推向盘的边缘，也不会注意到欧几里得几何学在您的坐标系中是不能应用的。难道这些论据都不足以使您相信您的坐标系是在做绝对运动吗？

今：一点也不！我自然注意到您所说的两种情况，但是我认定它们都是由于作用于我的圆盘上的引力场所引起的。从圆心指向圆盘外面的引力场，使我的坚硬的杆变形，使我的钟改变步调。引力场、非欧几何、步调不同的钟，在我看来都是密切相关的。不管采用哪一种坐标系，我必须同时认定相应的引力场的存在以及它对坚硬的杆和钟的影响。

古：但是您知道您的广义相对论所引起的困难吗？我想用一个简单的不属于物理学范围的例子来说清楚我的观点。设想一个理想的美洲式城市，它是由一些平行的南北大街和平行的东西大道组成的。大街与大道相互垂直；大街与大街之间，大道与大道之间的距离是一样的。如果这一假定被满足，则由街道围成的每一个区域的大小都是一样的。用这种方法，我可以很容易地表示出任何一区的位置。但是如果没有欧几里得几何学，这样一种构图法是不可能的。然而我们不可能把我们的整个地球用一个很大的理想的美洲式城市包盖起来。看一眼地球仪，您就相信这一句话了。但是我们也不能把您的圆盘用这样一种“美洲式城市结构”包盖起来。您说您的杆已经由于引力场的作用而变形了。您既然不能证明关于半径和圆周之比相等的欧几里得定理，这就清楚地表明如果您把这种街道结构延伸到很远的地方，迟早会发生困难，而发现在您的圆盘上这样构图是不可能的。您的圆盘上的几何图形很像曲面上的几何图形，而在很大面积的一块曲面上，这样的街道图自然是不可能的。再举一个更带物理性质的例子。取一个平面，这个平面的各个不同部分不规则地加热到不同的温度。您能够用受热便会在长度上膨胀的小铁条，画出图66所画的那种“平行——垂直”图吗？自然不能！您的引力场对您的杆所起的作用，正和温度的改变对小铁条所起的作用是一样的。

今：所有这些都不能把我难倒。街道图是用来决定一个点的位置的，而钟是用来决定事件的次序的。但是城市不一定必须是美洲式的，它也完全可以是古欧洲式的。设想您的理想城市是由塑性材料造成的，造成后再使它变形。虽然街道已经不是笔直的、等距的了，但是我还可以数出街区并认清街道。同样，在地球上虽然不是“美洲式城市”的街道

图形，但是我们也能用经纬度来指示点的位置。

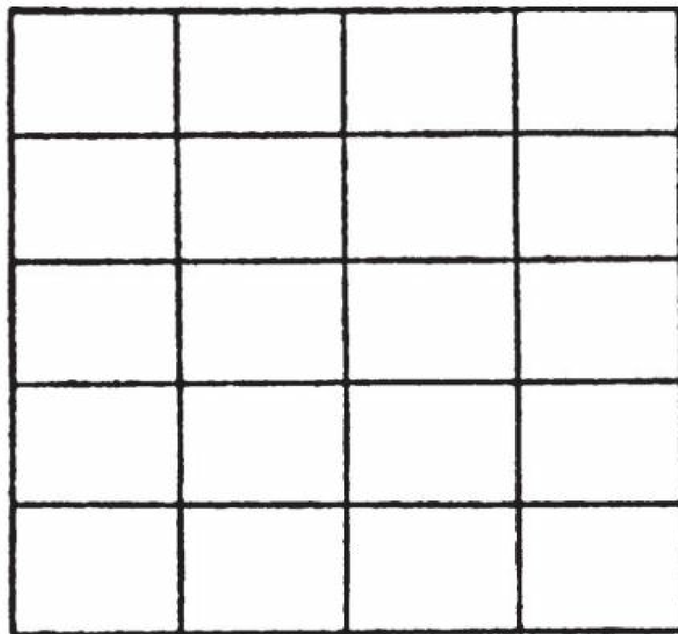


图66

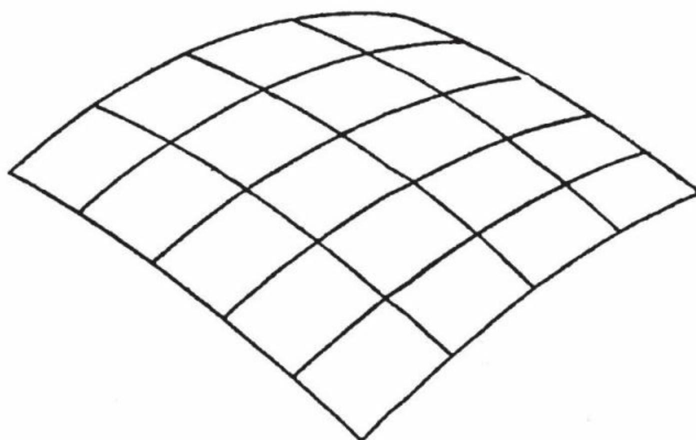


图67

古：但是我还是看到一个困难。您被迫使用您的“欧洲式的城市图”。我承认您能建立起事件或点的次序，但是这种作图法会使一切关于距离的测量混乱不清。它不能像我的作图法那样给您空间的**度量性质**。举例来说，我知道在我的美洲式城市中，走过十个街区所经过的距离是走过五个街区的两倍。因为我知道所有的街区是相等的，所以能够

立刻决定距离。

今：这些话都对。在我的“欧洲式城市图”中，我不能够立刻用变了形的街区的数目来决定距离。我必须知道更多的知识，我必须知道我的城市图的表面的几何性质。正如每个人都知道的，赤道上自经度0°至10°的距离，与北极附近同样自经度0°至10°的距离是不相等的。但是每个领航员都知道如何决定地球上这样两点之间的距离，因为他知道地球的几何性质。他或者根据球面三角学的知识来计算，或者用实验方法让船以同样的速度驶过这两段距离来计算。在您的情况中，整个问题是无关紧要的，因为所有的大街与大道之间的距离都是相等的。在地球的情况中，要复杂得多；0°与10°的两根经线在地球的两极处相遇，而在赤道上相距最远。在我的“欧洲式城市图”中也是一样，我必须比您在您的“美洲式城市图”中多知道一些知识，然后才能决定距离。我可以在每种特殊情况中研究我的连续区的几何性质，以得到这种知识。

古：但是这一切都不过表示放弃欧几里得几何学的简单结构而换上您那下定决心去使用的复杂的框架是如何不方便罢了。难道这是必需的吗？

今：我想是的，假如我们想把我们的物理学应用到任何坐标系中去但没有神秘的惯性坐标系，我承认我的数学工具比您的更复杂，但是我的物理学上的假设却简单得多、真实得多。

这个讨论只限于二维连续区。在广义相对论中争论的问题更为复杂，因为那里不是二维连续区而是四维时——空连续区。但是观念还是和描写二维空间的一样。在广义相对论中，我们不能像在狭义相对论中那样来应用平行与垂直的杆的力学框架和同步的钟。在任意一个坐标系中，我们不能像在狭义相对论的惯性坐标系中那样来用坚硬的杆和同快慢及同步的钟决定一个事件所发生的地点与时刻。我们仍然能够用非欧几里得的杆和快慢不齐的钟来确定事件。但是要用坚硬的杆和绝对同快慢与同步的钟来做的实际实验，只能在局部性的惯性坐标系中进行。在这种坐标系中，整个狭义相对论都是有效的。但是我们的“好的”坐标系

只是局部性的，它的惯性是受空间和时间的限制的。甚至在任意的坐标系中，我们也能预知在局部性的惯性坐标系中所做的测量的结果。但是要做到这一点，我们必须知道我们的时——空连续区的几何性质。

我们的理想实验只指出新的相对论物理学的一般性质。这些实验告诉我们，基本的问题是引力问题。它们还告诉我们，广义相对论把时间和空间的概念进一步推广了。

广义相对论及其实验验证

广义相对论企图建立一种能适用于一切坐标系的物理学定律。相对论的基本问题是引力问题。相对论是自牛顿时代以来第一个修正引力定律的理论。这是真正必需的吗？我们早已知道牛顿理论的伟大成就，以及建筑在他的引力定律基础上的天文学的巨大发展。牛顿定律直到现在还是一切天文计算的基础。但是，我们也听到了对于这个旧理论的一些责难。牛顿定律只能在经典物理学的惯性坐标系中有效，而我们记得，能应用力学定律的坐标系才是惯性的坐标系。两个质量之间的力与两者之间的距离有关。我们知道，对于经典转换，力与距离的关系是不变的。但是这个定律与狭义相对论的框架不符。对于洛仑兹转换，距离不是不变的。我们已经很成功地把运动定律推广到狭义相对论上去了，也应该可以设法把引力定律加以推广，使它适合于狭义相对论，或者换句话说，建立一种定律，使它对于洛仑兹转换是不变的，而不是对于经典转换是不变的。但是对于牛顿的引力定律，我们无论如何费尽心机，也无法将其简化而用到狭义相对论的范畴中去。我们即使在这方面成功了，也还需要做更进一步的努力：从狭义相对论的惯性坐标系进入广义相对论的任意的坐标系。另一方面，下落的升降机的理想实验明白地告诉我们，除非解决引力问题，我们绝不可能建立广义相对论。根据以上

的论证，我们已经知道了引力问题的解在经典物理学中和在广义相对论中各不相同的原因。

我们曾试图说明过导出广义相对论的途径，以及我们不得不再一次改变我们的旧观点的理由。我们不叙述这种理论的正规结构，而只表述新的引力理论与旧理论比较起来有些什么特色。熟悉了上述许多问题以后，要掌握这些差别的实质将不是十分困难的了。

1．广义相对论的引力方程可以应用于任何坐标系。在特殊情况下选择某一特定的坐标系只是为了方便而已。在理论上说，所有的坐标系都可以选择。如果不考虑引力，我们就会自动地回到狭义相对论的惯性坐标系。

2．牛顿的引力定律把此时此地的一个物体的运动和同时的远处的一个物体的作用连接在一起。这个定律已成为全部机械观的一个典范。但是，机械观崩溃了。在麦克斯韦方程中，我们看到了自然定律的一个新的典范。麦克斯韦方程是结构定律。它们把此时此地所发生的事件与稍迟和邻近所发生的事件联结起来。它们是描写电磁场变化的定律。我们的新的引力方程也是一种描写引力场变化的结构定律。粗略地来讲，我们可以说：从牛顿的引力定律过渡到广义相对论，很像从库仑定律的电流体理论过渡到麦克斯韦理论。

3．我们的世界不是欧几里得性的。我们的世界的几何性质是用质量及其速度来表达的。广义相对论的引力方程就是要揭露我们的世界的几何性质。

我们暂且假定广义相对论的预言已经实现了。但是，我们的想象是否离现实太远了呢？我们知道旧理论很好地解释了天文观察的结果。能否也在新理论与观察之间建立起一座桥梁呢？每一个想象都必须用实验来验证，而任何结果不论如何吸引人，假如与实际情况不符，便必须放弃。这个新的引力理论是怎样经受实验的检验的呢？这个问题可以用一句话来回答：旧理论是新理论的一种特殊的极限情况。假如引力比较弱，则旧的牛顿定律所得结果便会十分接近新的引力定律的结果。因此

所有支持旧理论的一切观察，也支持广义相对论。我们从新理论的更高水平上重新回到了旧理论。

即便我们不能提出另外的观察来支持新理论，即使它的解释和旧理论的解释的优越性不相上下，因而可以在两种理论之中随便选择一种，我们也应当选择新的。从形式上看来，新理论的方程要复杂得多，可是从基本原理来看，它简单得多。那两个可怕的鬼魂——绝对时间与惯性系已经不再出现了。引力质量与惯性质量相等的线索也没有被忽略。关于引力与距离的关系，不需要做任何假定。引力方程具有结构定律的形式，这是从场论的伟大成就以来任何物理学定律所需要的形式。

从新的引力定律可以推导出一些牛顿引力定律中所不包括的新的推论。我们已经引出了一个推论，即引力场中光线的弯曲。现在再介绍另外两个推论。

如果在引力比较弱时旧定律符合于新定律，那么只有在引力比较大的地方才能发现牛顿引力定律的偏差。就太阳系来说，所有的行星，连地球在内都是沿着椭圆的轨道绕太阳运动的。水星是离太阳最近的行星。太阳与水星之间的引力，比太阳与任何其他行星之间的引力大些，因为它离太阳的距离较小。假如存在可以发现牛顿定律的偏差的一线希望，则最大的机会是在水星的运动中去发现。根据经典理论，水星的运动轨道和任何其他行星的相同，只不过它离太阳最近。根据广义相对论，它的运动应该稍有不同。不仅水星要围绕太阳转动，而且它的椭圆轨道也应该很慢地对于跟太阳相联系的坐标系转动。这种椭圆轨道的转动体现了广义相对论的新的效应。新理论还预言了这个效应的数值。水星的椭圆轨道在300万年之内才完成全转一次。由此可见，这种效应是极小的，因而要在其他与太阳相距较远的行星中去发现这个效应更是没有希望了。

在提出广义相对论以前，便已经发现水星的运动轨道不是完全椭圆形的，但是无法加以解释。另一方面，广义相对论也不是为了研究这个专门问题而发展的。只有在后来，才从新的引力方程中推出关于行星在

围绕太阳而运动时其椭圆轨道本身也在转动的结论。在水星的例子中，理论成功地解释了水星的运动跟牛顿定律所预言的运动发生偏差的原因。

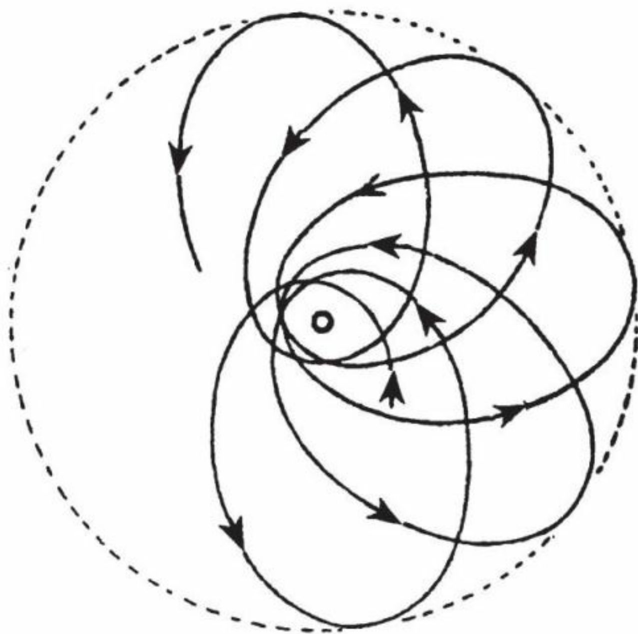


图68

但是，还有一个从广义相对论推出来而又可以和实验相比较的结论。我们已经知道放在转动的圆盘的大圆上的钟和放在小圆上的钟快慢不同。同样，根据相对论可以推导出，放在太阳上的钟跟放在地球上的钟快慢不同，因为引力场在太阳上比在地球上要强得多。

前面我们已经说过，炽热的钠会发射一定波长的单色黄光。在这种辐射中，原子显示了它发射的一种韵律；将原子比作一只钟，发射的波长则代表“钟”的韵律（快慢）。根据广义相对论，由太阳上的钠原子所发射的光的波长应该比地球上的钠原子所发射的光的波长稍稍大些。

用观察来检验广义相对论的推论是一个很复杂的问题，而且还没有找到确切的解决办法。因为我们只着重于主要的观念，所以不拟再从这方面做深入的讨论，但可以说，到目前为止，实验的判决似乎已承认广义相对论所推出的结论。

场与实物

我们已经知道了机械观崩溃的经过和原因。利用不能再变的粒子之间有简单的力在作用的假说来解释一切现象是不可能的。我们在电磁现象的范围内最先摆脱机械观和引入场的概念的企图，看来是十分成功的。电磁场的结构定律建立起来了，它是把空间和时间上毗邻的事件联系起来的定律。这些定律符合狭义相对论的框架，因为它们对于洛仑兹转换是不变的。后来广义相对论建立了引力定律。它们又是一种描写物质粒子之间的引力场的结构定律。要像广义相对论的引力定律那样，把麦克斯韦方程推广到能应用于任何坐标系中也是容易的。

我们有两种实在：**实物和场**。毫无疑问，我们现在不能像19世纪初期的物理学家那样，设想把整个物理学建筑在实物的概念之上。我们暂且接受实物和场的两个概念。我们能够认为实物和场是两种不同的实在吗？试就一小粒实物来说，我们想象这个微粒有确定的表面，在表面处实物便不再存在了，而它的引力场便出现了。在我们想象的图景中，可以应用场的定律的区域和有实物存在的区域是突然分开的。但是，区别实物与场的物理判据是什么呢？在我们熟悉相对论之前，可以这样回答这个问题：实物有质量而场没有质量。场代表能，实物代表质量。但是在我们熟悉更多的知识以后，已经知道这样的答案是不充分的。根据相对论，我们知道物质蕴藏着大量的能，而能又代表物质。我们不能用这个方式定性地来区别实物与场，因为实物与场之间的区别不是定性上的区别。最大部分的能集中在实物之中；但是围绕微粒的场也代表能，不过数量特别微小而已。因此我们可以说：实物便是能量密度特别大的地方，场便是能量密度小的地方。但是如果是这样的话，那么实物和场之间的区别，与其说是定性的问题，倒不如说是定量的问题。把实物和场看作彼此完全不同性质的两种东西是毫无意义的。我们不能想象有一个明确的界面把场和实物截然分开。

带电体与它的场之间也会遇到同样的困难。似乎不能有一个明显的定性的判据来分别实物和场或带电体和场。

我们的结构定律，即麦克斯韦定律和引力定律，在能量密度非常大的地方就失效了，或者说，在场源存在的地方，即带电体或实物存在的地方，便失效了。但是我们能否稍微改变我们的方程，使它能到处有效，甚至在能量密度极大的地方也有效呢？

我们不能把物理学只建立在纯粹是实物的概念基础上。但是在认识了质能相当性以后，实物和场的截然划分就有些牵强和不明确了。我们是否能够放弃纯实物的概念而建立起纯粹是场的物理学呢？我们的感觉器官作为实物来感受的东西，事实上只不过是大量的能集中在比较小的空间而已。我们可以把实物看作空间中场特别强的一些区域。用这种方法就可以建立起一种新的哲学背景。它的最终目的就是要用随时随地都能有效的结构定律去解释自然界中的一切现象。按照这种观点，抛出去的石子就是变化着的场，在变化着的场中，场强最大的态以石子的速度穿过空间。在我们这种新的物理学中，不容许有场和实物两种实在，因而场是唯一的实在。这个新观点是由于场物理学的巨大成就，是由于以结构定律的形式来表示电的、磁的、引力的定律的成功，也是由于质和能的相当而得到启发的。我们最后的问题便是改变场的定律，使它在能量密度极大的地方仍不致失效。

但是，至今我们还未曾有力而可靠地实现这个预示。究竟能否实现，还有待于“未来”做出决定。目前我们在所有实际的理论体系中还得假定两种实在：场和实物。

根本性的问题仍然摆在我们眼前。我们知道所有的实物只是由少数几种粒子组成的。各式各样的实物是怎样由这些基本粒子组成的呢？这些基本粒子与场是怎样相互作用的呢？为了寻求这些问题的答案，物理学中又引入了新的量子论的观念。

结语

在物理学中出现了一个新的概念，这是自牛顿的时代以来最重要的发明：场。用来描写物理现象最重要的不是带电体，也不是粒子，而是带电体之间与粒子之间的空间中的场，这需要很强的科学想象力才能理解。场的概念已被证明是很成功的，由这个概念便产生了描写电磁场的结构和支配电的和光的现象的麦克斯韦方程。

相对论是从场的问题上兴起的。由于旧理论的矛盾与不一致，迫使我们把新的性质归于自然界的一切现象的舞台——时——空连续区。

相对论的发展经过了两个阶段。第一阶段产生了所谓的狭义相对论，这种理论只能应用于惯性坐标系，即只能应用于牛顿所建立的惯性定律在那里有效的系统里。狭义相对论建立在两个基本假设上：在所有的相互做匀速直线运动的坐标系中，物理定律都是相同的；光速永远具有相同的值。从这两个被实验充分确认的假设中能推导出，运动的杆与钟具有随速度而改变其长度和韵律的性质。相对论改变了力学定律。如果运动的微粒的速度接近光速，旧的定律就失效了。相对论重新提出的关于运动物体的新定律由实验完满地确认了。相对论（狭义）的另一个结论便是质量和能量之间的关系。质量是能，而能也具有质量。相对论把质量守恒和能量守恒这两个定律结合成为一个质——能守恒定律。

广义相对论对时——空连续区做了更深入的分析。这个理论的有效性不再限于惯性坐标系。这个理论分析了引力问题，并且建立了引力场的新的结构定律。它迫使我们去分析几何学对描述客观世界的作用。它把引力质量和惯性质量的相等看成是必不可少的，而不像在经典力学中那样把它看成是无关紧要的。广义相对论的实验结果只与经典力学的略有不同。凡是能够进行比较的地方，它都经得起实验的考验。而这个理论的好处在于它的内在的一致性和它的基本假设的简单性。

相对论加强了场的概念在物理学中的重要性。但是，我们还不能建

立一种纯粹是场的物理学。就目前来说，我们仍然需要认定场与实物都一起存在。

---

1. 1码=91.44厘米。——编者注

4
量子

连续性、不连续性

我们面前摊着一张纽约和它周围地区的地图。我们问：这张地图上的哪些地点可以坐火车到达？在火车时刻表上查出这些地点以后，我们就在图上将它们标出来。现在我们换一个问题来问：哪些地点可以坐汽车到达？假使我们把所有从纽约出发的公路都在图上画出路线，那么，在这些路上的每一点都可以坐汽车到达。在两种情况中，我们都可以分成很多组点。在第一种情况中，它们是彼此分开的，代表各个不同的火车站；而在第二种情况中，它们是沿着代表整条公路的线上的许多点。我们的下一个问题是讨论从纽约（或者更精确些说，从这个城市的某一地点）到这些点的距离。在第一种情况中，有某些数对应于地图上的点。这些数的变化没有规则，但总是有限制的、跳跃式的。我们说：从纽约到可以坐火车到达的地点之间的距离，只能以**不连续**的方式变化。

但是那些可以坐汽车到达的地点的距离，却可以用任意小的段落来变化，它们可以用**连续**的方式变化。坐汽车时距离的变化可以任意小，而坐火车时却不能。

煤矿的生产量也可以用连续的方式变化。生产出来的煤可以增加或减少任意小的部分。但是在矿上工作的矿工的数目只能以不连续的方式变化。如果有人说“从昨天起，工人的数目增加了3.783个”，这句话就毫无意义了。

一个人在别人问他口袋里有多少钱时，只能说出一个有两位小数的数。钱的总数只能不连续地、跳跃式地变化。在美国，允许的最小变化，或者像我们所要说的，美国钱币的“基本量子”是1分。英国钱币的基本量子是1法新[注]，它只值美国基本量子的一半。现在我们有了一个关于两种基本量子的例子，它们的价值可以相互比较。这两个价值的比例具有确定的意义，因为这两个当中一个的价值是另一个的两倍。

我们可以说：某些量可以连续地变化，而另外一些量只能不连续地变化，即以一个不能再小的单位一份一份地变化。这些不可被再分的量就叫作某一种量的**基本量子**。

我们称大量沙子的时候，虽然它的颗粒结构非常明显，但还是认为它的质量是连续的。但是如果沙子变得很珍贵，而且所用的秤非常灵敏，我们就不得不考虑沙子质量变化的数目，永远是一个颗粒的质量的倍数。这一个颗粒的质量，就是我们的基本量子。从这个例子我们可以看到，以前一直被认为是连续的量，由于我们测量精密度的增大，显示出不连续性来。

假如我们要用一句话来表明量子论的基本观念，我们可以这样说：**必须假定某些以前被认为是连续的物理量是由基本量子所组成的**。

量子论所包含的论据范围是很大的。这些论据是由高度发展的现代实验技术所揭露的。由于不可能证明及描述这些基本实验，我们常常直接引出它们的结果而不加说明。我们的目的只是解释最重要的基本观

念。

物质和电的基本量子

在动力论所描绘的物质结构的图景里，所有的元素都是由分子构成的。我们拿最轻的元素——氢作为最简单的例子。我们已经知道，研究布朗运动使我们能决定一个氢分子的质量。它等于：

0.000 000 000 000 000 000 000 003 3克。

这意味着质量是不连续的。氢的质量只能按最小单位的整数倍来变，每一个最小单位对应于一个氢分子的质量。但是化学过程表明，氢分子可以被分为两部分，或者换句话说，氢分子是由两个原子组成的。在化学过程中，起基本量子作用的是原子，而不是分子。用2除以上面的数字，就得出氢原子的质量，它约等于：

0.000 000 000 000 000 000 000 001 7克。

质量是一个不连续的量。但是，在决定物体的重量时，当然不必考虑这一点。即使是最灵敏的秤，要达到能够检测出质量不连续变化的精确度还是差得很远。

让我们回到大家所熟知的情况。把一根金属线与电源相连接，电流就由高电势流向低电势而通过导体。我们记得，有很多实验论据是用电流体在导线中流动的这个简单理论来解释的。我们也记得，是“正流体”从高电势流向低电势，还是“负流体”由低电势流向高电势，只不过是习惯上的规定而已。我们暂且不管由场的概念而得到的所有进展。即使当我们只想到电流体这样一个简单的术语时，也仍然有一些问题需要解决。正如“流体”这个名称本身所暗示的，早前电被认为是连续的量。按照这种旧的观念，电荷的量可以按任意小的一份去变化，而不必假设

基本的电量子。物质动力论的建立使我们提出一个新的问题：电流体的基本量子是否存在呢？还有一个要解决的问题：电流是由正电流体的流动组成的，还是由负电流体的流动组成的，或是两者兼而有之呢？

所有回答这个问题的实验，其基本观念都是：将电流体从导线中分离出来，使它在真空中流过，并割断它和物质的任何联系，然后研究它的特性。在这种情形下，这些特性应当显示得更清楚了。19世纪末，人们进行了很多这类的实验。在说明这些实验安排的想法以前，我们至少将在一个例子中先把结果引出来。在导线中流过的电流体是负的，因而它流动的方向是由低电势流向高电势。假使我们在建立电流体理论伊始就知道了这一点，我们一定会把所用的名词改换一下，把硬橡胶棒所带的电叫作正电，而把玻璃棒所带的电叫作负电。这样把流过导线的流体看作正电，就方便多了。但是由于一开始我们就做了错误的猜测，现在只好忍受这种不方便了。

下一个重要问题是：这种负的电流体的结构是不是“粒状的”，它是不是由电量子组成的。又有大量独立的实验指出，毫无疑问，这种负电的基本量子是确实存在的。负的电流体是由微粒构成的，正如海滩是由沙粒构成或者房子是由一块一块砖砌成的一样。汤姆孙（J. J. Thomson）在约40年前就很清楚地把这个结果提出来了。负电的基本量子被称为**电子**。因此任何负电荷都是由大量的用电子来代表的基本电荷组成的。负电荷和质量一样，只能不连续地变化。但是基本电荷是如此之小，以至于在很多研究中，把电荷看成是连续的不但可以，而且有时甚至更方便些。这样，原子和电子理论就在科学中引入了新的只能跳跃地变化的不连续的物理量。

设想有两块金属平板，它们周围的空气都被抽完了。一块带正电荷，而另一块带负电荷。放在这两块金属板之间的一个带正电荷的检验体，将被带正电荷的板排斥，又被带负电荷的板吸引。这样，电场的力线的方向将从带正电荷的板指向带负电荷的板（图69）。作用在带负电荷的检验体上的力，则方向相反。假使金属板足够大，则两板之间的电

场力线的密度到处都相等。不管检验体放在哪里，这个力的大小和力线的密度都到处一样。在两板之间产生出来的电子，会像地球的引力场中的雨滴一样，彼此平行地由带负电的板向带正电的板运动。已经有很多著名的实验装置可以将一阵电子雨放入这样一个能使电子指向同一方向的电场中。最简单的方法之一是：在带电金属板之间放置烧热的金属线。烧热的金属线发射出电子，电子射出来后就受着外电场的力线的影响沿力线方向运动。举个例子，大家熟知的无线电电子管，就是根据这个原理被制造出来的。

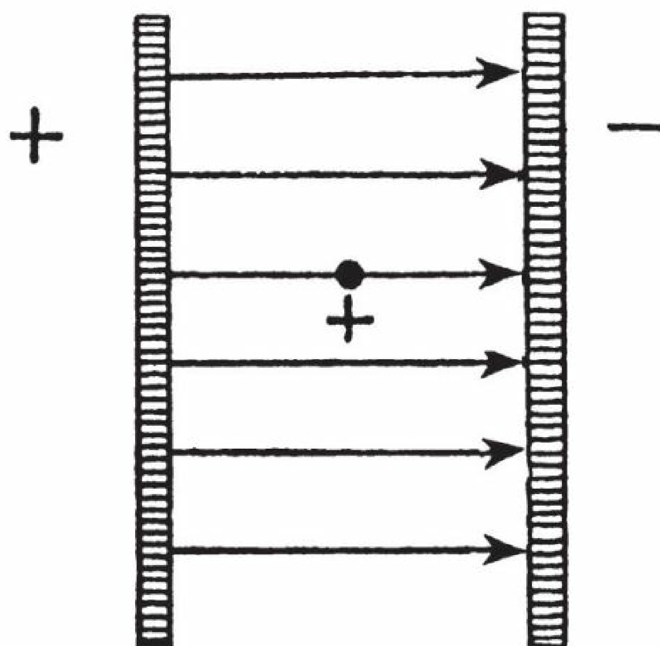


图69

科学家针对电子束进行了很多极为巧妙的实验，研究它们在不同的外电场和外磁场中轨道的改变，甚至分离出单个电子来决定它的基本电荷和质量（即电子对于外力作用的惯性抗力）。这里我们只引用一个电子质量的数值。它大约是氢原子质量的1/2000。因此，氢原子的质量虽然很小，但和电子的质量相比就显得很大了。从统一场论的观点看来，电子的全部质量（也就是它的全部能量）是它的场的能量；场的能量强度大部分集中在一个很小的球体内，而离开电子“中心”较远的地方场的能量就弱了。

我们在前面讲过，任何一种元素的原子就是这种元素本身最小的基本量子。长久以来，人们都是相信这个说法的。但是，现在我们不再相信了！科学建立了新的观点，指出了旧观点的局限性。在物理学中，原子具有复杂结构这个论据已经是确凿无疑的了。首先确认了电子——负电流体的基本量子——也是原子的组元之一，是建成所有物质的基本“砖块”之一。上面所引用的炽热的金属线发射出电子的例子，只不过是从物质中取出电子的无数例子中的一个。毫无疑问，这个把物质结构的问题和电的结构问题紧密地联系起来的结果，是和大量的独立实验的论据相符的。

从原子中把组成原子的几个电子抽取出来，是比较容易的。可以用加热的办法，例如我们的炽热金属线的例子，也可以用另外的方法，例如用其他电子来轰击这个原子。

假设把一根炽热的细金属丝插入稀薄的氢气中。金属丝将向所有的方向发射电子。在外电场的作用下，它们会获得一定的速度。一个电子的加速正如在引力场中下落的一个石子一样，利用这个方法可以获得以一定方向和速度运动的电子束。用很强的电场作用于电子，我们现在已可使电子的速度达到接近光速的地步。当具有一定速度的电子束打在这些稀薄的氢气的分子上时，将会发生什么事情呢？足够快的电子打到氢分子上时，不但将氢分子分裂为两个氢原子，而且还从两个原子中的一个“抽”出一个电子来。

让我们接受电子是物质的组元这一事实。那么，被打出了电子的原子就不可能是电中性的了。假使它以前是中性的，那么现在就不可能是中性的，因为它缺少了一个基本电荷。剩下的部分应该具有正电荷。而且，由于电子的质量远比最轻的原子小，我们尽可以得出这样的结论：原子的绝大部分质量不是由电子贡献的，而是由比电子重得多的、剩下的基本粒子贡献的。我们把原子的这个重的部分叫作它的核。

现代实验物理学已经发展了分裂原子核的方法，把一种元素的原子转变为另一种元素的原子的方法，以及把组成原子核的重质量的基本粒

子从核中取出的方法，等等。这个以“原子核物理学”命名的物理学分支，卢瑟福（Rutherford）对它的贡献最大。从实验的观点看来，这部分是至关重要的。

但是至今还缺少一种能将原子核物理学范畴内大量论据联系起来而其基本观念又很简单的理论。因为本书只注重一般的物理学观念，所以尽管这个分支在现代物理学中非常重要，我们还是将它撇开不谈。

光量子

让我们来考察建筑在海边上的一道堤岸。海浪不断地冲击堤岸，每一次海浪都把堤岸冲刷掉一些，然后退回去，让下一个波浪再打上来。堤岸的质量在逐渐减小。我们可以问一问，一年当中有多少质量被冲掉了。现在我们再来想象另一个过程。我们要用另外一种方法来使堤岸失去同样的质量。我们向堤岸射击，子弹射到的地方堤岸就被剥裂下来，堤岸的质量就因而减小。我们很可以设想，用两种方法可以使质量的减小完全相等。但是从堤岸的外观上，我们很容易查出堤岸是被连续的海浪还是被不连续的“弹雨”打过了。为了使我们理解下面将描述的现象，最好先记住海浪和弹雨之间的区别。

我们以前说过，炽热的金属线会发射电子。现在我们介绍另外一种从金属中打出电子的方法。把某种具有一定波长的单色光，例如紫光，照射在金属表面上。光就把电子从金属中打出来。电子在金属中被打了出来，一阵电子雨便以一定的速度向前运动。根据能量守恒定律，我们可以说：光的能量有一部分转化为被打出来的电子的动能。现代的实验技术已能使我们记录这些电子“子弹”的数目，测定它们的速度，因而也测定它们的能量。这种把光照射在金属上打出电子的现象叫作**光电效应**。

我们的出发点是研究一定强度的单色光的光波的作用。但是现在我们应当像在所有的实验中所做的一样，改变一下实验装置，看看对于我们所观察到的效应有什么影响。

首先我们把照射在金属面上的紫色的单色光的强度加以改变，并注意被发射出来的电子的能量，看它在多大程度上依赖于光的强度。让我们暂且不用实验的方法而试用推理的方法来找寻解答。我们可以这样推理：在光电效应中，一定有一部分辐射能转变为电子的动能。如果我们用同一波长但由更强的光源发出的光再来照射金属，那么，发射出的电子的能量就应该比较大，因为这时辐射的能量比以前大了。因此我们可以预言：假使光的强度增大，发射出的电子的速度也应增大。但是，实验却和我们的预言相反。我们再一次看出，自然界的规律并不会顺从我们的主观愿望。我们碰到了一个和我们的预言相矛盾的实验，因而也就粉碎了我们做预言所根据的理论。从波动说的观点看来，实验的结果是出人意料的。所有观察到的电子都有同样的速度、同样的能量，它们的速度和能量并不随光的强度的增加而改变。

波动说不能预言实验的结果。于是从旧理论与实验之间的冲突中又有一个新理论兴起了。

让我们故意不公正地对待光的波动说，忽视它的巨大成就，忽视它对于在非常小的障碍物附近光线发生弯曲现象（光的衍射）所做的圆满解释。将我们的注意力集中在光电效应上，并要求波动说对这个效应做出足够的解释。显然，我们不能从波动说中推论出为什么光照射在金属上打出的电子的能量和光的强度无关。因此，我们试用其他的理论。我们记得，牛顿的微粒说能解释许多已观察到的光的现象，但是在解释我们现在故意忽略的衍射现象时却完全失败了。在牛顿时代，还没有能量的概念。按照牛顿的理论，光的微粒是没有重量的。每一种色保有它自己的物质特性。后来，能量的概念建立起来了，而且认识到光是有能量的，但没有人想到把这些概念用于光的微粒说。牛顿的理论衰落以后，直到20世纪为止，还没有人认真地考虑过它的复兴。

为了保持牛顿理论的基本观念，我们必须假设：单色光是由能——粒子组成的，并用光量子来代替旧的光微粒。光量子以光速在空中穿过，它是能量的最小单元。我们把这些光量子叫作**光子**。牛顿理论以这个新的形式复兴，就得出**光的量子论**。不但物质与电荷有微粒结构，辐射能也有微粒结构，就是说，它是由光量子组成的。除了物质量子和电量子以外，还同时存在着能量子。

光量子的观念是在20世纪初普朗克（Planck）为了解释某一比光电效应复杂得多的现象而首先提出的。但是，光电效应极其简单而清楚地指出了改变我们的旧概念的必要性。

我们立刻就会明白，光的量子论能够解释光电效应。一阵光子落到金属板上。这里辐射与物质的相互作用是由许许多多的单过程组成的，在这些过程中，光子碰击原子并将电子从原子中打了出来。这些单过程都是相似的，因此在每一种情况下，打出的电子具有同样的能量。我们也可以理解，增加光的强度，照我们的新语言来说就是增加落下的光子数目。在这种情况下，金属板就有更多的电子被打出来，而每一单独电子的能量并不改变。因此，我们可以知道这个理论与观察的结果是完全一致的。

假使用另外一种颜色的单色光束，譬如说，用红色的来代替紫色光打到金属面上，将发生什么情况呢？让实验来回答这个问题吧。必须测出用红光发射出的电子的能量，并拿它和紫光打出的电子的能量加以比较。红光打出的电子的能量比紫光打出的电子的能量小。这就表示，光色不同，它们的光子的能量也不同。红色光的光子的能量比紫色光的光子的能量小一半。或者更严格地说：单色光的光量子的能量与波长成反比。这就是能量子和电量子之间的一个主要区别。各种波长有各种不同的光量子，可是电量子却总是一样的。假使用以前提到过的例子做比喻，我们可以把光量子比作最小的“钱币”量子，而不同的国家的最小钱币量子是各不相同的。

我们继续放弃光的波动说而假定光的结构是微粒性的，光是由光量

子组成的，而光量子就是以光速穿过空间的光子。这样，在我们的新的图景里，光就是光子“雨”，而光子是光能的基本量子。但是假使波动说被完全抛弃，波长的概念也随之消失了。代替它的是什么样的新概念呢？是光量子的能量！用波动说的术语来表达的一番话，可以被翻译成用辐射量子论的术语来表达。例如：

波动说的术语	量子论的术语
单色光有一定的波长。光谱中红端的波长比紫端的波长大一倍。	单色光含有一定能量的光子。光谱中红端光子的能量比紫端光子的能量小一半。

物理学的目前局面可以被概括如下：有一些现象可以用量子论来解释，但不能用波动说来解释；光电效应就是这样一个例子，此外还有其他的例子已被发现。又有一些现象只能用波动说来解释而不能用量子论来解释，典型的例子是光遇到障碍物会弯曲的现象。还有一些现象既可用量子论又可用波动说来解释，例如光的直线传播。

到底光是什么东西呢？是波还是光子“雨”呢？我们以前也曾经提出过类似的问题：光到底是波还是一阵微粒？那时是抛弃光的微粒说而接受波动说的，因为波动说已经可以解释一切现象了。但是，现在的问题远比以前复杂。单独应用这两种理论的任一种，似乎已不能对光的现象做出完全而彻底的解释了。我们似乎有时得用这一种理论，有时得用另一种理论，有时又要两种理论同时并用。我们已经面临了一种新的困难。现在有两种相互矛盾的实在的图景，两者中的任何一个都不能圆满地解释所有的光的现象，但是结合起来就能够了！

怎样才能够把这两种图景统一起来，又怎样理解光的这两个完全不同的方面呢？要讨论这个新的困难是不容易的。我们再一次碰到了一个根本性问题。

目前我们暂且采用光的光子论，并试图用它来帮助理解那些以前一直用波动说解释的论据。这样，我们就能强调那些乍一看来使两种理论

互相矛盾的困难。

我们记得，穿过针孔的一束单色光会形成光环及暗环。我们如果放弃波动说，怎样能借助于光的量子论来理解这个现象呢？一个光子穿过了针孔。我们可以期望，如果光子是穿过针孔的，幕上应当显示出光亮；如果光子不穿过，则是暗的。但事实不是这样，我们看到了光环和暗环。我们可以试着这样来解释：也许在光子和针孔边缘之间存在着某种相互作用，因此出现了衍射光环。当然，这句话很难被认为是一个解释。它最多只是概括出一个解释的预示，使我们能建立起一些希望，希望在将来用通过光子和物质的相互作用来解释衍射现象。

但即使是这个微弱的希望也被我们以前讨论过的另外一个实验装置粉碎了。假设有两个小孔。穿过这两个小孔的单色光，将在幕上显出光带和暗带。用光的量子论的观点应当如何理解这个效应呢？也许我们可以这样论证：一个光子穿过两个小孔中的任意一个。假如单色光的光子是光的基本粒子，我们就很难想象它能分裂开来并同时通过两个小孔。而那时效应就应当和单孔时完全相同，应该是光环和暗环而不是光带和暗带。为什么那时存在了另外一个小孔就把效应完全改变了呢？显然，即使另外一个小孔在相当远的地方，而光子并不通过它也因为它的存在会将光环和暗环变成光带和暗带。如果光子的行为和经典物理中的微粒一样，它一定要穿过两个小孔中的一个。但是在这种情况下，衍射现象就似乎完全不可理解了。

科学迫使我们创造新的观念和新的理论。它们的任务是拆除那些常常阻碍科学向前发展的矛盾之墙。所有重要的科学观念都是在实在跟我们的理解之间发生剧烈冲突时诞生的。这里又是一个需要有新的原理才能求解的问题。在试图讨论用现代物理学解释光的量子论和波动说的矛盾以前，我们将指出，如果我们不讨论光量子而讨论物质量子，也会出现同样的困难。

光谱

我们已经知道所有的物质都由少数几种粒子组成。电子是最先被发现的物质基本粒子。但电子也是负电的基本量子。我们又知道有一些现象迫使我们认定光是由基本光量子组成的，并认定波长不相同则光量子也不相同。在继续讨论下去以前，我们必须先讨论一些现象。在这些现象中，物质和辐射起着同样重要的作用。

太阳发出的辐射可以被三棱镜分解为它的各个组元。这样就得到了太阳的连续光谱。凡是在可见光谱线两端之间的各种波长都在这里显示出来。我们再来举另一个例子。以前已经提过，炽热的钠会发射只有一种色或一种波长的单色光。假使把炽热的钠置于三棱镜前面，我们只看到一条黄线。一般而言，一个辐射体被置于棱镜之前，它所辐射的光就被分解为它的各个组元，显示出发射体的谱线特性。在一个充有气体的管中放电，就产生了类似于广告用的霓虹灯那样的一种光源。假定把这样一个管子放在一个光谱仪前面。光谱仪的作用和棱镜一样，不过它更精确、更灵敏；它将光分解为各个组元，也就是说，它把光加以分析。通过光谱仪看太阳光，就出现连续光谱；光谱仪中表示出各种不同的波长。但是，如果光源是有电流在其中流过的气体，光谱的性质就不同了。它不是太阳的连续多色光谱，而是在一片暗黑的背景上出现光亮而彼此分开的光带。每一条光带，如果它很狭窄，便对应于一种颜色，或者用波动说的语言来说，对应于一种波长。例如，在光谱中看到20条谱线，就有20种波长，则每一条谱线可以用对应于波长的20个数中的一个来表示。不同元素的气体具有不同的线系，因而标明组成光谱的各种波长的数的组合也不同。在各种元素各自特有的光谱中，任何两种元素不会有完全相同的谱线系统，正如任何两个人不会有完全相同的指纹一样。物理学家积累了许多谱线的资料并将其汇编成目录以后，逐渐明确了这里面存在着一定的规律；而且可以用一个简单的数学公式来代替那些看上去好像没有关系的表示各种波长的几列数目。

所有上面所讲的都可以被翻译成光子的语言。每一条谱线对应于某种波长，换句话说，就是对应于具有某种能量的光子。因此发光气体并不发出任何能量的光子，而只发出标明这种物质特点的那些光子。我们再一次看到了可能性确乎很多，但“实在”却对它们严加限制。

某一种元素的原子（例如氢原子）只能发出具有确定能量的光子。只有确定能量的光子才被允许发出，其他的都是被禁止的。为了简单起见，我们设想某一元素只发射出一条谱线，也就是只发出能量完全确定的一种光子。原子保有的能量在发射前要丰富些，在发射后要贫乏些。根据能量守恒原理，原子在发射前的**能级**一定较高，而发射后的**能级**一定较低，两个能级之差就等于发出的光子的能量。因此，某一种元素的原子只发射一种波长的辐射（即只发射确定能量的光子）的说法，可以用不同的方式来表达：某一种元素的原子只允许有两个能级，而光子的发射相当于原子从较高的能级向较低的能级跃迁。

但是一般而言，在元素的光谱中，谱线总不止出现一条。发射出来的光子对应于许多种能量而不只是对应一种。或者，换一个说法，我们必须认定在原子内部可以有许多个能级，光子的发射对应于原子由一较高的能级跃迁到较低的能级，但重要的是，并非所有的能级都是被允许的，因为在一种元素的光谱里，并不是所有的波长或所有的光子能量都出现。我们现在不说每一种原子的光谱内有某些确定的谱线或某些确定的波长，而说每一种原子有某些确定的能级，光量子的发射与原子从一个能级向另一能级跃迁相关。一般说来，能级不是连续的，而是不连续的。我们再一次看到了“实在”对太多的可能性加以限制。

玻尔（Bohr）最先证明了为什么正好是这些谱线而不是另外一些谱线出现在光谱里。他的理论描绘出一个原子的图景。根据这个理论，至少在简单情况下，元素的光谱可以被计算出来，而在外表上看来枯燥而又不相关的数目在这个理论的解释之下就突然变得密切相关了。

玻尔的理论是走向更深远而普遍的理论的一个过渡性理论。这个更深远而普遍的理论被称为波动力学或量子力学。本书最后部分的意图就

是要表明这个理论的主要观念。在这以前，我们还要再讲一个理论更深、更专门性的实验结果。

我们的可见光谱是从紫色的某一波长开始，而以红色的某一波长为止。或者换句话说，在可见光谱中，光子的能量永远被限制在紫光和红光的光子能量之间的一个范围内。当然，这个限制只是由于人类眼睛的特性所致。假使有些能级之间的能量之差相当大，那么将有一种**紫外光**的光子发射出来，形成一条在可见光谱以外的谱线。肉眼不能检验出它的存在，必须借助于照相底片。

X射线也是由光子组成的，它的光子的能量比可见光的大得多；也就是说，X射线的波长要比可见光的波长短得多（事实上要短到几千分之一）。

但是，能不能够用实验方法来测定这样小的波长呢？对于普通光来说，做到这一点已经是够难的了。我们必须有非常小的障碍物或很小的孔。用两个非常靠近的针孔可以显出普通光的衍射现象；如果要显示出X射线的衍射，这两个小孔就必须再小几千倍而且要再靠近几千倍。

那么，我们怎样能够测量这些射线的波长呢？自然界本身帮助我们达到了这个目的。

一个晶体是原子的一个集合，这些原子彼此相隔非常近而且排列得井井有条。图70表示一个晶体结构的简单模型。我们用元素的原子所构成的障碍物代替小孔，这些原子排得非常紧密而且极有秩序。根据晶体结构理论，我们知道原子之间的距离小得可以将X射线的衍射效应显示出来。实验证明，事实上可以用晶体内这些紧密地靠在一起而且有规则地排成三维排列的障碍物来使X射线的波发生衍射。

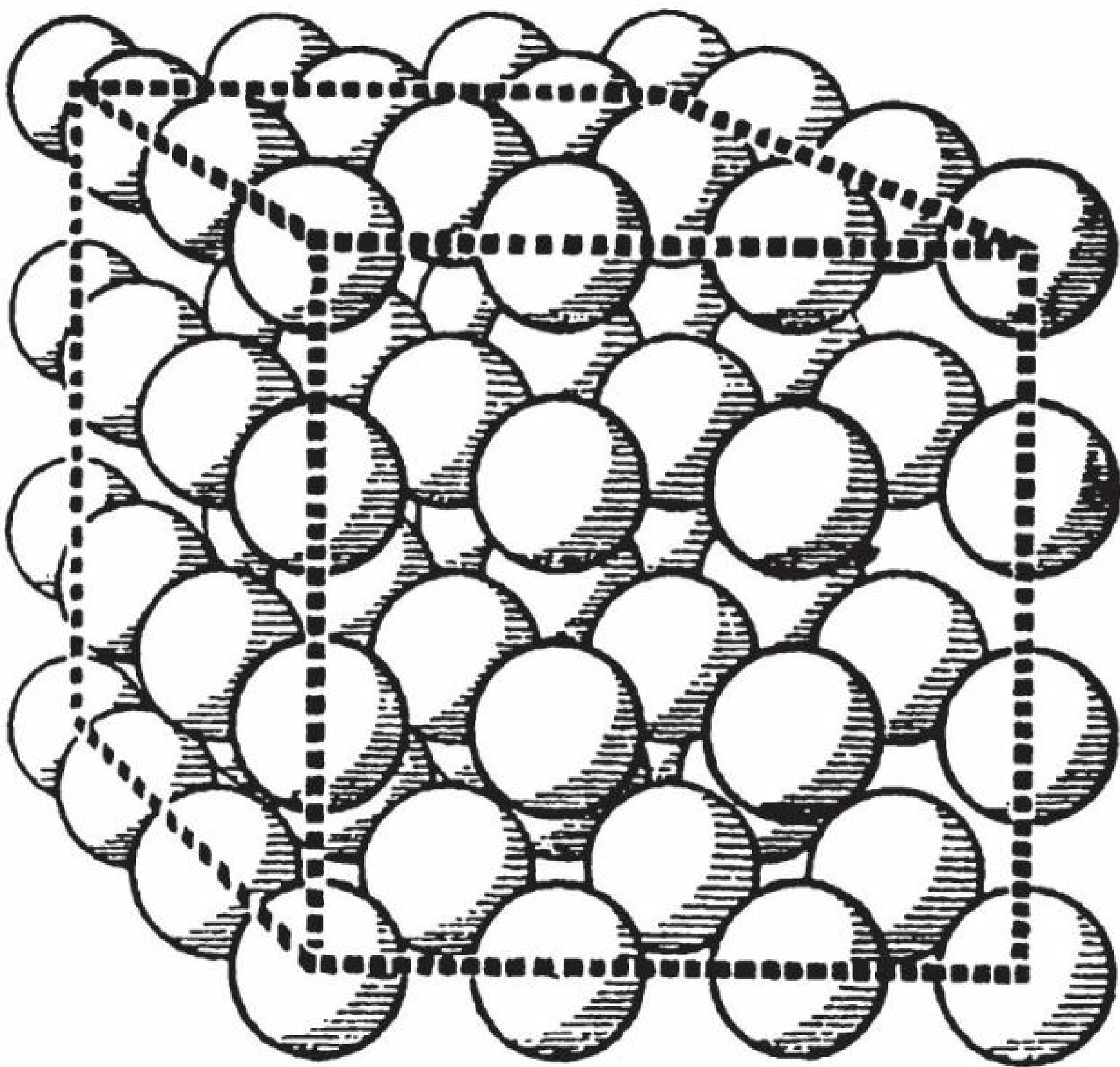


图70

假设有一束X射线射在晶体上，射线穿过晶体以后，被记录在照相底片上。照相底片就显示出衍射图样。现在已经有许多种方法用来研究X射线光谱以及从衍射图样中推算波长数据。这里我们只用几句话来说明这些内容，如果要详细地说明理论上与实验上的细节，就非写成厚厚的几册书不可了。在书末的附图Ⅲb中，我们只表示出各种方法中的一种方法所得出的一类衍射图样。我们再一次看到了很能够表示波动说的暗环和光环。在中心处可以看到未被衍射的光线。如果晶体不放在X射线和照相底板之间，则在照片中心只能看到光斑。从这类照片中可以计

算出X射线光谱的波长；如果波长已知，也可根据照片来决定晶体的结构。

物质波

在元素的光谱中只出现某些特殊的波长，这一情况我们怎样来理解呢？

在物理学上往往因为通过在表面上互不相关的现象之间进行一致的类比，结果竟取得很重要的进展。在本书中，我们也常常看到在某一科学分支上建立和发展起来的概念，后来就被成功地应用于其他分支。机械观和场论的发展中有很多这类例子。将已解决的和未解决的问题联系起来也许可以想到一些新概念来帮助我们解决困难。很肤浅的类推是容易找到的，但它们实际上不说明任何问题。有些共同的特性却隐藏在外表上的差别的背后，要能发现这些共同点，并在这基础上建立一个新的理论，这才是重要的创造性工作。由德布罗意（De Broglie）和薛定谔（Schrödinger）创始的所谓“波动力学”的发展，就是用这种深刻的类推方法而得出极为成功的理论的一个典型例子。

我们的出发点是一个与现代物理学完全无关的经典例子。我们握住一根极长的软橡皮管（或极长的弹簧）的一端，有节奏地做上下摆动，于是这一端便发生振动。这时，像我们在许多例子中所见到的一样，振动产生了波，这种波以一定的速度通过橡皮管而传播。假设橡皮管是无限长的，那么，波一旦出发，就会毫无阻碍地继续它们无止境的旅程。

再看另一个例子。把上面所说的橡皮管两端都固定起来。假如你喜欢，用提琴的弦也可以。现在如果在橡皮管或琴弦的一端产生了一个波，将会发生什么样的情况呢？和前面的例子中一样，波开始它的旅程，但很快就被另一端反射回来。现在我们有两种波，一种是由振动产

生的，另一种是由反射产生的；它们向相反的方向行进而且互相干涉。追踪这两种波的干涉现象并发现它们叠加而成的一种波并不困难，这种波被称为驻波。“驻”和“波”两个字的意义似乎是相互矛盾的，然而这两个字联合起来正说明它是两种波叠加的结果。



图71

驻波的最简单的例子是两端固定的弦的一上一下的运动，如图72所示。这个运动是当两个波朝相反的方向行进时有一个波覆在另一个波上面的结果。它的特点是只有两个端点保持静止。这两个端点叫作**波节**。驻波就驻定在两个波节之间，弦上所有各点都同时达到它们的偏移的最大值和最小值。

但这只是驻波的最简单形式，还有其他形式的驻波。例如，有一种驻波可以有三个波节，两端各一个，中央一个。在这种情况中，有三点永远保持静止。从图73可以看到，这里的波长比图72中只有两个波节的短一半。同样，驻波可以有四个、五个甚至更多的波节，其波长与波节的数目有关。波节的数目只能是整数而且只可以跳跃式地改变。“驻波波节的数目等于3.576”这样的说法显然是没有意义的。这样，波长只能不连续地变化。在这个最经典性的问题里，我们看出了量子理论的著名特色。提琴上所产生的驻波实际上更为复杂，它是许多具有两个、三个、四个、五个甚至更多个波节的波混合而成的，也就是说，它是许多不同波长的波的混合体。物理学可以把这样的混合体分解为组成它的简单驻波。或者，用我们以前的术语，我们可以说，振动的弦如同一种元素发出辐射一样，有它自己的谱。正如元素的光谱一样，它只可以有一

些特定的波长，其他的波长是被禁止的。

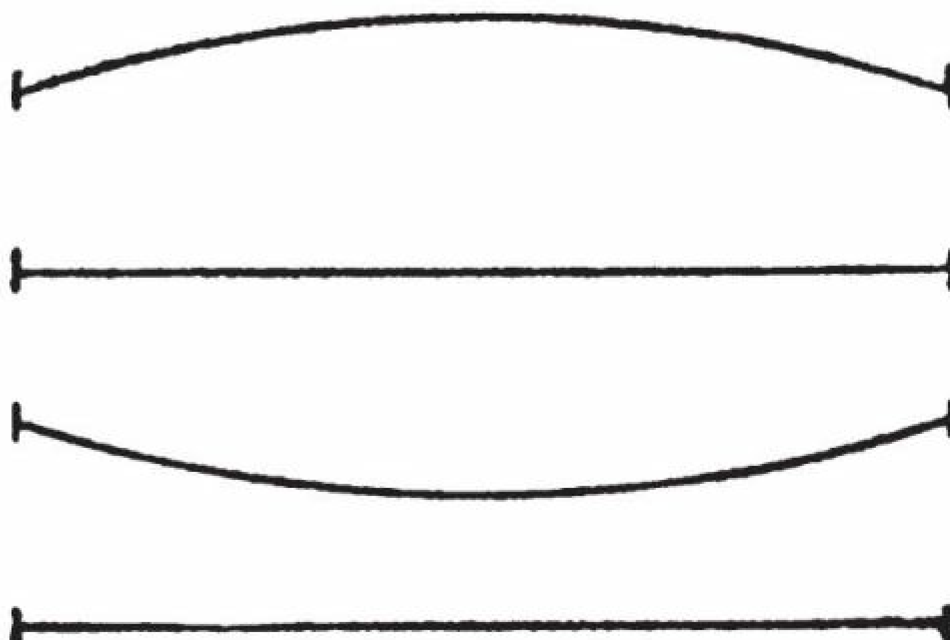


图72

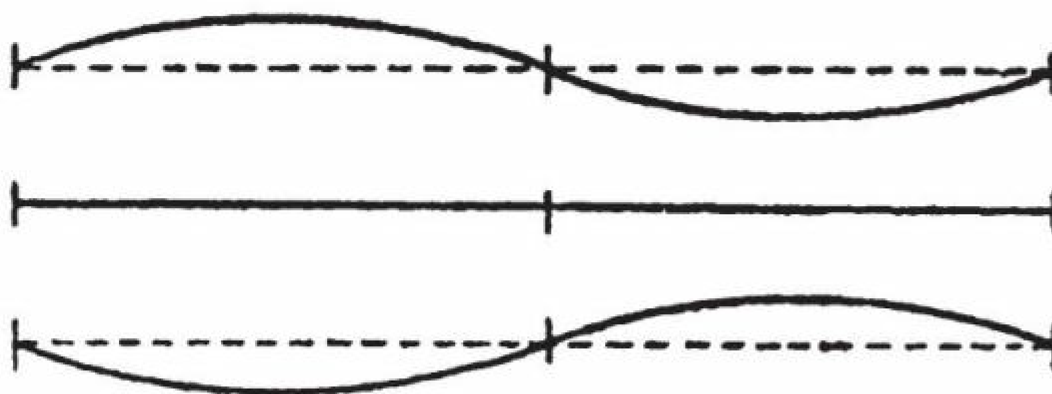


图73



图74

因此，我们发现了振动的弦和发出辐射的原子之间的某些相似性。这个类比似乎很奇怪，但既然选择对其进行类比，就让我们从这个比喻中得出进一步的结论，并对其进行比较。

每一元素的原子都是基本粒子组成的，重粒子组成原子核，轻粒子就是电子。这样一个粒子体系的行为正和产生驻波的一个小乐器一样。

然而，驻波是两个或更多个行波之间发生干涉的结果。假使我们的比拟有几分真实，那么在传播中的波就应当有比原子更简单的排列方式。什么东西排列得最简单呢？在我们的物质世界中，没有什么东西比不受任何力作用的基本粒子——电子更简单了，所谓不受外力作用的电子就是静止的或做匀速直线运动的电子。我们可以在这个比拟的链条中再猜出新的一环来：将匀速直线运动的电子比作一定波长的波。这就是德布罗意的新的大胆创造的观念。

以前曾经指出过，在某些现象中，光显示出波动性，但在另一些现象中，光显示出微粒性。在已经习惯于用光是一种波的观念以后，发现光在某些场合中（例如在光电效应中）的行为像一阵光子，就会感到很惊奇。对于电子，我们现在的情况正好和这相反。我们已经习惯于用电子是粒子、电和物质的基本量子的观念了。它的电荷和质量也已经被测出。如果德布罗意的观念有几分真实性的话，那么物质就应该在某些现象中显示出波动的性质。这个结论是根据声学上的类比而得出的。乍一看好像是奇怪而难以理解的。运动的微粒怎么会和波发生任何关系呢？但是这一类的困难在物理学中已碰到过不止一次了。在研究光的各种现象中，我们也遇到过同样的问题。

在建立一个物理学理论时，基本观念起了最主要的作用。物理书中充满了复杂的数学公式。但是所有的物理学理论都是起源于思维与观念，而不是公式。在观念以后应该采取一种定量理论的数学形式，使其能与实验相比较。这可以用我们目前在讨论的例子来说明。主要的一个猜想是：匀速运动的电子在某些现象中的行为和波类似。假设一个电子

或一群电子（其中所有的电子具有相同的速度）匀速地运动，每一个单电子的质量、电荷和速度都是已知的。如果我们想以某种方式把波的概念和匀速运动的电子联系起来，那就必须提出下一问题：波长是多少？这是一个定量的问题，应该建立一个多少带有定量性质的理论来回答这个问题。事实上，这个问题很简单。德布罗意在他的著作中给出了这个问题的答案，其数学上的简单性是最令人惊奇的。在他的工作完成时，其他物理学理论的数学手法，相对说来就深奥和复杂得多了。在物质波的问题中所用的数学工具非常简单和浅近，但基本观念却极为深奥。

前面在讨论光波和光子时曾指出过，每一句用波动说的语言来表达的话，都可以被翻译成为光子说或光的微粒说的语言。电子波也是如此。用微粒说的语言来表达匀速运动的电子大家都很熟悉了。但每一句用微粒说的语言来表达的话，和光子的情况一样，都可被翻译为波动说的语言。有两个线索暗示着翻译的法则。一个线索是光波和电子波之间或光子和电子之间的类比。我们试图将对于光的翻译方法同样用之于实物。狭义相对论提供了另一个线索：自然定律对于洛仑兹转换应该是不变的，而不是对于经典变换是不变的。这两个线索合起来便决定了对应于运动电子的波长。例如以每秒10 000英里的速度运动着的一个电子，其波长很容易被计算出来，它与X射线处于同一波长范围内，这一结果与理论相符。由此可进一步得出结论：如果物质的波动性可以被检测出来，则所用的实验方法必定和检察X射线的波动性的方法相似。

设想有一电子束以一定的速度做匀速运动，它（或者用波动说的术语来说，有一均匀的电子波）打到非常薄的晶体上，晶体起着衍射光栅的作用。晶体中的衍射障碍物之间的距离小到可以使X射线产生衍射现象。因此，对于波长的数量级与X射线相同的电子波，我们可以预期它也会有同样的效应。照相底片应当记录下电子波通过晶体薄层的这种衍射。实验真切地证明了这个理论的无可怀疑的重大成就：电子波的衍射现象。比较一下附图Ⅲ中的照片，我们可以看到电子波衍射和X射线衍射之间的相似性是极为明显的。我们知道，这种图可以用来决定X射线的波长，对于决定电子波的波长也具有同样好的功用。衍射图样显示出

物质波的波长，也显示出理论与实验在定量方面的完全相符，这就完满地确认了我们所做的一连串论证。

这个结果使得我们以前所遭遇的若干困难扩大并加深了。只要举一个例子便能明白，这个例子与讨论光波时所用的例子相似。一个电子射到一个很小的针孔上时，将像光波那样发生偏转。照相底片上显示出光环与暗环。也许有几分希望可以用电子和针孔边缘的相互作用来解释这现象，虽然这样解释似乎把握不大。但是，在两个针孔的情况下将怎样解释呢？出现的是光带而不是光环。为什么有另外一个小孔存在就使效应完全变样了呢？电子是不可分裂的，它似乎只能穿过两个小孔当中的一个。电子在穿过一个小孔时怎么会知道在某些距离之外还存在着另一个小孔呢？

以前我们问过：光是什么？它是一阵粒子还是一个波？现在我们要问：物质是什么，电子是什么？它是一个粒子还是一个波？电子在外电场或外磁场中运动时的行为像粒子，但在穿过晶体而衍射时的行为又像波。对于物质的基本量子，我们又遇到了在讨论光量子时所遇到的同一困难。科学的现代发展中所发生的最基本的问题之一是：怎样把物质和波这两种对立的观点统一起来。这是基本困难之一，一旦被解决，从长远看来一定会促使科学进步。物理学正努力解决这个问题。现代物理学目前所提出的解是暂时的还是最终的解，后世一定会做出判断。

概率波

按照经典力学来说，如果我们已知某一质点的位置和速度，以及所作用的外力，就可以根据力学定律而预言它未来的整个路径。在经典力学中，“质点在如此这般的一个时刻有着如此这般的位置和速度”这句话具有完全确定的意义。假设这样一句话失去了它的意义，则我们以前所

做的关于预言未来过程的论证就站不住脚了。

19世纪初，科学家曾经想把整个物理学归结为作用在质点上的简单的力，这些质点在任何时刻具有确定的位置和速度。我们来回想一下，当我们在物理学领域内开始讨论力学问题时是如何描述运动的。我们沿一定路线画出许多点，表示物体在一定时刻的准确位置；随后又画出切线矢量，表示速度的大小和方向。这个方法既简单又方便。但是对于物质的基本量子（电子）或能量的基本量子（光子），就不能照样搬用了。我们不能用经典力学中描画运动的方法来描画光子或电子的经行路程，两个小孔的例子很清楚地说明了这点。电子或光子似乎是穿过两个小孔的。因此，用从前的经典方法来描画电子或光子的路程，就不可能解释这种效应了。

我们当然必须认定像电子或光子等穿过两个小孔时的基本作用的存在。物质的基本量子和能的基本量子的存在是不容怀疑的。不过基本定律肯定不能用经典力学中只说明它们在任一时刻的位置和速度那样简单的方式来表述。

因此，要试试其他不同的方法。我们不妨将同一基本过程不断加以重复。把电子一个接着一个朝小孔方向射去。这里用“电子”这两个字只是为了叙述得明确一些而已，我们的论证对于光子也同样适用。

把同一个实验以完全相同的方式重复很多次；在实验中，所有的电子具有同样的速度并且都对着两个小孔的方向运动。不用说，这是一个理想实验，事实上不可能实现，不过很容易想象而已。我们不能像用枪发射子弹那样在一定时刻把电子或光子一个一个地发射出去。

一系列重复实验的结果一定仍然是：一个小孔的是光环和暗环，而两个小孔的是光带和暗带。但是，有一个主要的差异。如果只有一个单独的电子实验一次，实验的结果便不可理解。如果把实验重复许多次，就比较容易理解了。我们现在可以说：光带就是有很多电子落在上面的地方。而电子落得比较少的地方就成为暗带。完全暗黑的斑点表示一个电子也没有落到这个地方来。我们当然不能认定所有的电子都穿过两个

小孔中的一个。因为假如是这样的话，打开或关闭另一个小孔就应当没有什么区别了。但是我们已经知道，当关上了第二个小孔时，所得到的结果是不同的。由于一个粒子是不可分裂的，我们也不能认定它同时穿过两个小孔。把实验重复多次的情况指出了另一条出路：某些电子穿过第一个小孔，而另一些电子穿过第二个小孔。

我们不知道为什么个别电子特地选择了这个或那个小孔，不过重复实验的最后结果一定是两个小孔都参加了把电子从发射源传送到屏幕去的工作。如果我们只说到在实验重复很多次时一群电子所发生的事，而不考虑单个电子的行为，那么有光环的图和有光带的图之间的区别就变得可以理解了。通过对一系列实验进行讨论，一个新的想法诞生了，即其中个体的行为是不可预知的。我们不能预言某一个别电子的经行路程，但是我们可以预言，屏幕上会显示出光带和暗带。

我们暂且不谈量子物理学。

在经典物理学中，我们看到，如果我们已知某一时刻质点的位置和速度，以及作用在它上面的力，就可以预言它的未来路径。我们也看到了力学的观点怎样被应用到物质动力论中去。但是根据我们的推理，有一个新的观念在这个理论中诞生了。全盘地掌握这个观念，对于理解以后的论证是很有帮助的。

设想有一充满气体的容器。要想探查每一粒子的运动，必须首先找出它的初始状态，即所有粒子的初始位置和初速度。即使可能这样做，要把结果记在纸上也是一生一世都写不完的，因为要考察的粒子的数量实在太多了。假使有人因此试图用经典力学中已知的方法来计算粒子的最终位置，困难也是无法被克服的。原则上可能采用计算行星运动所用的那种方法，但是在实践上这种方法是没有用处的，而必须用**统计方法**来代替。这种方法不需要对初始状态有确切的知识。对于一个体系在任一已知时刻的情况知道得比较少，我们能说出它的过去或未来也比较少。我们现在不去关心个别气体粒子的命运了。我们的问题的性质不同了。例如，我们不问“在这一时刻每一个粒子的速率有多少？”，而要

问，“有多少粒子具有每秒1 000英尺至1 100英尺的速率？”我们不管个体，只去测定能代表整个集体的平均值。很明显，统计的推理方法只能用于由数量非常多的个体组成的体系。

应用统计方法，我们不能预言群体中一个个体的行为，而只能预言个体做某些特殊方式的行为有多少机会（**概率**）。假如统计律告诉我们有1/3的粒子的速度是每秒1 000英尺到1 100英尺，就表示对大量粒子进行许多重复的观察，才会得到这个平均值；或者换一个说法，这表示在这个速度范围内找到一个粒子的概率是1/3。

同样，知道一个大的社区的出生率，并不意味着知道了任何个别家庭是否生了孩子。这只表示统计的结果，在这些结果中，个体的性质是不起作用的。

通过对大量汽车的牌照的观察，我们会很快发现这些牌照的号码中有1/3可以被3整除。但我们不能预言下一时刻将要通过的一辆汽车的牌照号码是否具有这个性质。统计规律只能用于大集合，而不能用于组成这个集合的单一个体。

现在，我们可以回到量子问题上来了。

量子物理学的规律都是统计性质的。这句话是说，它们不是关联于一个单一体系的规律，而是关联于许多同等体系的一个集合的规律；这些规律不能由对一个个体所做的测量来验证，而只能用一系列重复的测量来验证。

放射性蜕变就是量子物理学企图为许多事件建立它们的规律的一个事件，即量子物理学企图建立一个规律来支配怎样由一个元素自发地转化为另一元素。例如，我们知道1克镭经过1600年，会蜕变一半，剩下一半。我们可以预言接下来的半个小时内，大约有多少原子将要蜕变；但是我们即使用理论上的描述，也不能说明为什么正好是这些原子注定要走向蜕变的道路。根据目前的知识，我们没有能力指出哪些原子是注定要蜕变的。一个原子的命运并不取决于它的龄期。支配它们单独行为

的规律，连一点线索都没有。我们只能建立支配原子大集合的统计规律。

再举另一个例子。把某一种元素的发光气体放在光谱仪之前，就显现出一些有确定波长的谱线。一组不连续的、确定的波长的出现，是原子内部存在基本量子的表示。但是，这个问题还有另一方面。谱线中有一些十分清楚，而另一些则比较模糊。清楚的谱线表示属于这个特定波长的光子发射出来的数量比较多，而模糊的谱线则表示属于这个波长的光子发射出来的数量比较少。这个理论再一次告诉我们，它只是统计性质的。每一谱线相应于一个由较高能级到较低能级的跃迁。理论只告诉我们这些可能的跃迁中每一个跃迁的概率，而完全不提及某一特定原子真实的跃迁。这种理论在这里是很适用的，因为所有这些现象中都涉及巨大的集合，而不是单个的个体。

看来新的量子物理学与物质动力论有某些相似之处，因为二者都是统计性质的，而且都关联于巨大的集合。但实际上并不如此。在这个类比中，不仅了解其相似性是重要的，了解它们之间的差别更为重要。物质动力论和量子理论的相似性主要在于它们的统计性质。但差别怎样呢？

假使我们想知道在某一城市里超过20岁的男人和女人有多少，就必须叫每个公民填写调查表上的性别、年龄等栏。假设每个人都填对了，那么我们把它数一下再加以分类，就得到了统计性的结果。这时，表中所写的个人的姓名和地址是无关紧要的。我们的统计观点是根据许多个体的知识而得来的。同样，在物质动力论中支配集体行为的统计规律是根据个体的规律而得到的。

但是在量子物理学中，情况就完全不同了。这里的统计规律是直接得出的，完全排除了个体的规律。在穿过两个小孔的电子或光子的例子中，我们已经看到，不能像经典物理学中所做的那样去描述基本粒子在空间和时间里可能的运动。

量子物理学放弃基本粒子个体的规律而**直接**说明支配集体的统计规

律。我们不可能根据量子物理学像经典物理学那样去描述基本粒子的位置和速度，以及预言它未来的路径。量子物理学只和集合打交道，它的规律也是关于集合的规律而不是关于单一的个体的。

是迫切的需要，而不是爱好空想或爱好新奇的心理迫使我们改变古老的经典观念。我们只要举出一个例子（衍射）就足以说明应用旧观点的困难了。但也可以举其他很多同样有力的例子。我们力图理解实在，因此不断地被迫改变观点。但是只有等到将来，才能决定我们所选择的是不是唯一可能的出路，是不是还可以找到更好的解决困难的办法。

我们现在已经放弃把个体的例子作为在空间和时间里的客观现象来描述，我们现在已经引入统计性的规律。它们是现代量子物理学的主要特征。

以前，在介绍新的物理实在，例如电磁场和引力场的时候，我们曾尽量用通俗的字句来说明已经用数学方法表述其观念的那些方程式的特色。现在我们用同样的方法来说明量子物理学，我们只非常粗略地提到玻尔、德布罗意、薛定谔、海森伯（Heisenberg）、狄喇克（Dirac）和玻恩（Born）等人的工作。

我们来考察一个电子的情形。电子可以受任意外部电磁场的影响或完全不受外力的影响。例如，它可以在一个原子核的场中运动，或者在一个晶体上衍射。量子物理学告诉我们如何建立这些问题的数学方程。

我们已经认识到振动的弦、鼓膜、吹奏乐器以及任何其他声学仪器为一方，辐射的原子为另一方这两方面的相似性。在支配声学问题的数学方程和支配量子物理学问题的数学方程之间也有某些相似性。但是，这两种情形中所确定的量的物理解释又是完全不同的。除了方程式有某些形式上的相似以外，描述振动弦的物理量和描述辐射原子的物理量具有完全不同的意义。以振动的弦为例，我们要问弦上任意一点在任意时刻与正常位置的偏差有多少。知道了这一时刻弦的振动形状，我们就知道了所有需要知道的东西了。因此在任一其他时刻对于正常位置的偏差，可以由弦的振动方程计算出来。对于弦上每一点相应于某一确定的

偏差这一情况，可以更严格地用下述方式来表达：在任何时刻对正常位置的偏差是弦的坐标的**函数**。弦上全部的点构成一个一维连续区，而偏差就是在这个连续区中所确定的函数，并可由弦的振动方程计算出来。

类似地，在电子的例子中也有决定空间中的任一点和任一时刻的某一函数。这个函数被称为**概率波**。在我们所做的类比中，概率波相当于声学问题中的与正常位置的偏差。概率波是一定时刻的三维连续区的函数；而在弦的情况中，偏差是一定时刻的一维连续区的函数。概率波构成了我们正在研究的量子体系的知识总汇，它使我们能够回答所有和这个体系相关的统计问题。它并不告诉我们电子在任一时刻的位置和速度，因为这样一个问题在量子物理学中是没有意义的。但是它告诉我们在特定的一点上遇到电子的概率，或者告诉我们什么地方上遇到电子的机会最多。这个结果不仅涉及一次测量，而且涉及很多次重复的测量。因此，量子物理学方程的决定概率波，正像麦克斯韦方程的决定电磁场，或万有引力方程的决定引力场一样。量子物理学的定律又是一种结构定律。但是由这些量子力学的方程所确定的物理概念的意义要比电磁场及引力场抽象得多，它们只提出了解答统计性问题的一套数学方法。

到目前为止，我们只考察了在某些外场中的一个电子的情况。如果我们不是考察这一种最小带电体的电子，而是包含有亿万个电子的某一带电体，就可以将整个量子论置之度外，而按照旧的在量子论以前的物理学来讨论问题。在讨论到金属线中的电流、带电的导体、电磁场等的时候，我们可以应用包含在麦克斯韦方程中的旧的简单的物理学。但是在讨论到光电效应、光谱线的强度、放射性、电子波的衍射以及其他许多显示出物质和能的量子性的现象中，却不能这样做。这时我们应该“更上一层楼”。在经典物理学中，我们讲过一个粒子的位置与速度，而现在则必须考虑相应于这个单粒子问题的三维连续区中的概率波。

假如我们早已学会怎样用经典物理的观点来叙述问题，则更能体会到量子力学对于类似的问题有它特有的叙述方法。

对于一个基本粒子（电子或光子），如果把实验重复许多次，我们

就得到三维连续区中的概率波表示这个体系的统计性的行为。但是当不是一个，而是有两个相互作用的粒子，例如两个电子、一个电子和一个光子，或一个电子和一个原子核的时候，情况将会怎样呢？正因为它们之间有相互作用，所以我们不能将它们分开来讨论，不能用一个三维的概率波来分别描述它们中的每一个。实际上，不难猜想在量子力学中应该如何来描述由两个相互作用的粒子所组成的体系。我们暂且下降一层楼，再回到经典物理学去。空间中两个质点在任何时刻的位置是用六个数来表示的，每一点有三个数。这两个质点所有可能的位置构成了一个六维连续区，而不是像一个质点那样构成三维连续区。如果我们现在又上升一层楼回到量子物理学来，我们就有了六维连续区中的概率波，而不是像一个粒子那样的三维连续区中的概率波。同样，对于三个、四个以至更多个粒子的概率波将分别是在九维、十二维以及更多维连续区上的函数。

这里很清楚地指出概率波比存在和散布于我们的三维空间内的电磁场及引力场更为抽象。多维连续区构成了概率波的背景，而只有在一个粒子的情况下，维度的数目才和一般的物理空间的维度的数目相等。概率波唯一的物理意义就在于它使我们既可以回答在多粒子情况下各种有意义的统计性问题，也可以回答在只有一个粒子情况下的同样问题。例如对于一个电子，我们可以求出在某一特定地点遇到一个电子的概率。而对于两个电子，问题就变成了这样：在一定时刻，两个粒子处于两个特定的位置上的概率是多大？

我们离开经典物理的第一步，是放弃了将个别的情况作为空间和时间中的客观事件来描述。我们被迫采用了概率波所提供的统计方法。一旦选择了这个方法，我们就被迫向更抽象的道路前进。因此，必须引入对应于多粒子问题的多维概率波。

为简便起见，我们把量子物理学以外的全部物理学叫作经典物理学。经典物理学与量子物理学截然不同。经典物理学的目的在于描述存在于空间的物体，并建立支配这些物体随时间而变化的定律。但是那些

揭露实物与辐射的微粒性和波动性的现象，以及明显地带有统计性质的基本现象（例如放射性蜕变、衍射、光谱线的发射以及其他许多现象），都迫使我们放弃这个观点。量子物理学的目的不是描述空间中的个别物体及其随时间的变化。“这一个物体是如此这般的，它具有如此这般的一种性质”这样的说法在量子物理学中是没有地位的。代替它的是这种说法：“有了如此这般的概率，个别物体是如此这般的，而且具有如此这般的性质。”在量子物理学中，支配个别物体随时间而变化的定律是没有地位的。代替它的是支配概率随时间而变化的定律。只有这个由量子论引起的物理学的基本变化，才能使我们圆满地解释现象世界中许多现象所具有的明显不连续性和统计性。在这些现象中，实物和辐射的基本量子揭露了不连续性和统计性的存在。

然而，新的更困难的问题出现了，这些问题直到目前还没有弄清楚。我们只谈谈这些不能解决的问题中的几个问题。科学不是而且永远不会是一本写完了的书。每一个重大的进展都带来了新问题。从长远来看，每一次发展总要揭露出新的、更深层次的困难。

我们已经知道，在一个粒子或许多个粒子的简单情形中，可以从经典的描述提升到量子的描述，从对空间与时间中事件的客观描述提升到概率波的描述。但是我们记得在经典物理中极为重要的场的概念。怎样能够描述实物的基本量子和场之间的相互作用呢？如果对十个粒子的量子描述需要用一个三十维的概率波，那么对于一个场做量子描述时就需要一个无限维数的概率波了。从经典的场的概念跃迁到量子物理学中概率波的相应问题，是极为困难的。在这里上升一层楼不是一件容易的事，到目前为止，为解决这问题而做的一切努力都应当被认为是不能令人满意的。还有另外一个基本问题。在所有我们关于由经典物理跃迁到量子物理的论证中，我们都用了旧的、非相对论的描述；在这种描述中，时间和空间是分开讨论的。但是，如果我们试图从相对论所提出的经典描述开始，要把经典的场的概念提升到量子问题就显得更为复杂了。这是现代物理学要解决的另一个问题，但离完满的解答还是很远。还存在另外一个困难，就是对于组成原子核的重粒子来说，形成一致的

物理性质还有进一步的困难。虽然在阐明原子核问题方面已经有了很多实验数据，也做了许多努力，但是对于这个领域内有些最基本的问题，我们还是模糊不清的。

毫无疑问，量子物理学解释了许多不同的事实，对大部分问题，理论和观察很一致。新的量子物理学使我们离旧的机械观愈来愈远，要恢复原来的地位，比过去任何一个时期更加不可能。但是这也是毫无疑问的，量子物理学仍旧应该根据两个概念：实物和场的概念。在这个意义上，它是一种二元论，因此对于实现我们把一切归结为场的那个老问题并没有丝毫帮助。

今后的发展是沿着量子物理学所选定的路线前进，还是把革命性的新观念引入物理学中来更有希望呢？前进的道路是否也像过去常常走过的那样，突然来一个急转弯呢？

近几年来，量子物理学的全部困难已经集中在几个主要问题上，物理学正在焦急地等待着它们被解决。但是，我们没有方法预知这些困难将在何时何地得到澄清。

物理学与实在

本书中所叙述的物理学的进展只是用粗线条的方式描画了最基本的观念，从这里可以做出怎样的总的结论呢？

科学不是一本定律汇编，也不是把各种互不相关的论据集合在一起的总目录，它是用来自由地发明观念和概念的人类智力的创造物。物理学理论试图做出一个实在的图景并建立起它和广阔的感觉印象世界的联系。判定我们的心理结构是否正当的唯一方法只在于看看我们的理论是否以及用什么方法构成了这样一座桥梁。

我们知道，物理学的进展已经创造了新的实在。但是这根创造实在之链也可以被远远追溯到建立物理学之前。最原始的概念之一便是一个客观物体。一棵树、一匹马以至任何一个物体的概念都是根据经验得来的创造物，虽然由此产生的印象比起外在的现象世界来还是很原始的。猫捉弄老鼠，也是在用思维创造它自己的原始的实在。猫永远以同样的方法来对付所有它遇到的老鼠，这表明它也产生了概念和理论，这些概念和理论就是它在自己的感觉印象世界中的准则。

“三棵树”和“两棵树”有些不同。而“两棵树”又不同于“两块石头”。从客观物体中产生又从客观物体中解脱出的纯粹的数字2、3、4……的概念是思想的创造物，是用来描述我们的现实世界的。

心理上关于时间的主观感觉，使我们能够整理我们的印象，使我们说得出某一事件发生在另一事件的前面。但是用一只钟将每一时刻和一个数联结起来，将时间看成一个一维连续区，就已经是一项发明了。因此，欧几里得和非欧几里得的几何概念以及把我们所在的空间看作一个三维连续区的概念也都是一种发明。

物理学实际上是以发明质量、力和惯性系为开端的。所有这些概念都是一些自由的发明。它们导致了机械观的建立。

对于19世纪初的物理学家来说，我们的外部世界的实在是由粒子组成的，在粒子之间作用有简单的力，这些力只与距离有关。他力图一直保持他的信念，他总认为利用这些关于实在的基本概念来解释自然界的一切现象必将成功。有关磁针偏转所发生的困难，有关以太结构所发生的困难，都启发我们建立更精细的实在。于是，电磁场的重大发明出现了。要整理和理解现象，重要的不是领会物体的行为，而是领会位于物体之间的某种东西的行为，即场的行为。这必须发挥大胆的科学想象力才能完全领会。

以后的发展既摧毁了旧概念，又创立了新概念。绝对时间和惯性坐标系被相对论抛弃。所有现象的背景不再是一维的时间连续区和三维的空间连续区，而是具有新的转换性质的四维的时——空连续区，这又是

另一个自由的发明。惯性坐标系不再需要了。任何一种坐标系对于描述自然现象都同样适用了。

量子理论又创造了关于实在的新的重要特色。不连续性代替了连续性。放弃了支配个体的定律，出现了概率的定律。

现代物理学所创造的实在，确实与旧时代的实在大有差别。但任何物理学理论要想达到的目的依然是相同的。

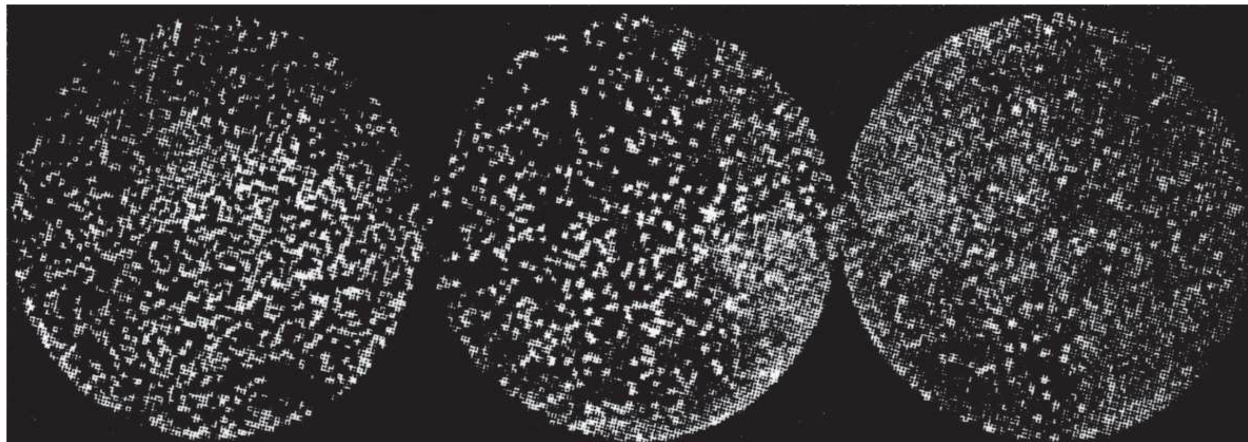
我们力图借助于物理学理论为自己寻求一条通过大量已观察到的情况所构成的迷宫的道路，以整理和理解我们的感觉印象。我们希望观察到的情况能够和我们对实在所做的概念相符合。如果不相信我们的理论结构能够领悟客观实在，如果不相信我们世界的内在和谐性，就不会有任何科学。这种信念是，并且永远是一切科学创造的根本动机。在我们所有的努力中，在每一次新旧观念之间的戏剧性斗争中，我们坚定了永恒的求知欲望，以及对于我们的世界和谐性的始终不渝的信念。在求知上所遭遇的困难愈多，这种欲望与信念愈增强。

结语

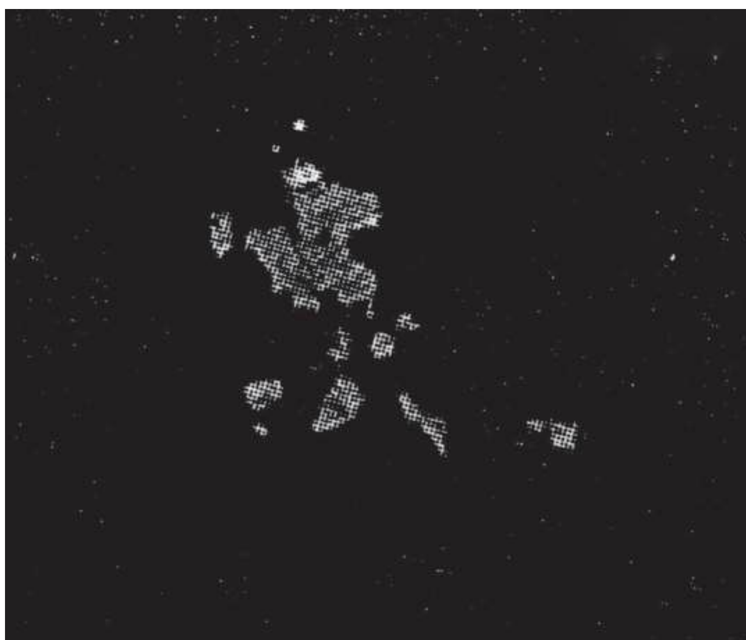
在原子现象领域内的大量各种不同的论据，再一次迫使我们建立新的物理概念。物质具有微粒结构；它是由基本粒子——物质量子组成的。因此，电荷也有微粒结构，而且，从量子论观点来说，最重要的是能也有微粒结构。组成光的光子是能量子。

光是波还是一阵光子呢？一束电子是一阵基本粒子还是一种波呢？实验迫使物理学去考虑这些基本问题。为寻求答案，我们不能像描述空间与时间中的现象那样去描述原子现象，而是进一步回避旧的机械观。量子物理学所建立的规律是掌握集合的，而不是掌握个体的，它所描述

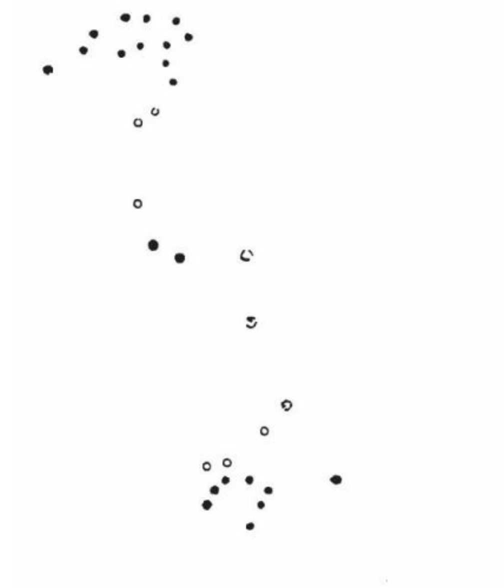
的不是特性而是概率，它不建立揭露体系的未来的规律，而只建立支配概率随时间变化以及关联于个体所组成的大集合的规律。



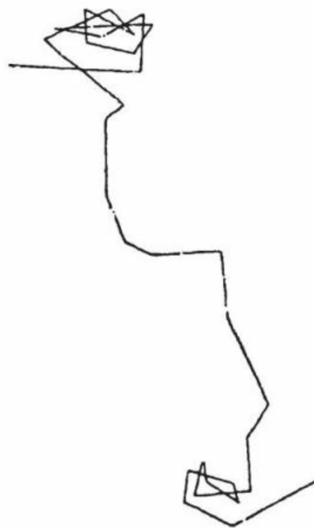
附图Ia 显微镜中看到的布朗粒子
[F.佩林（F. Perrin）摄]



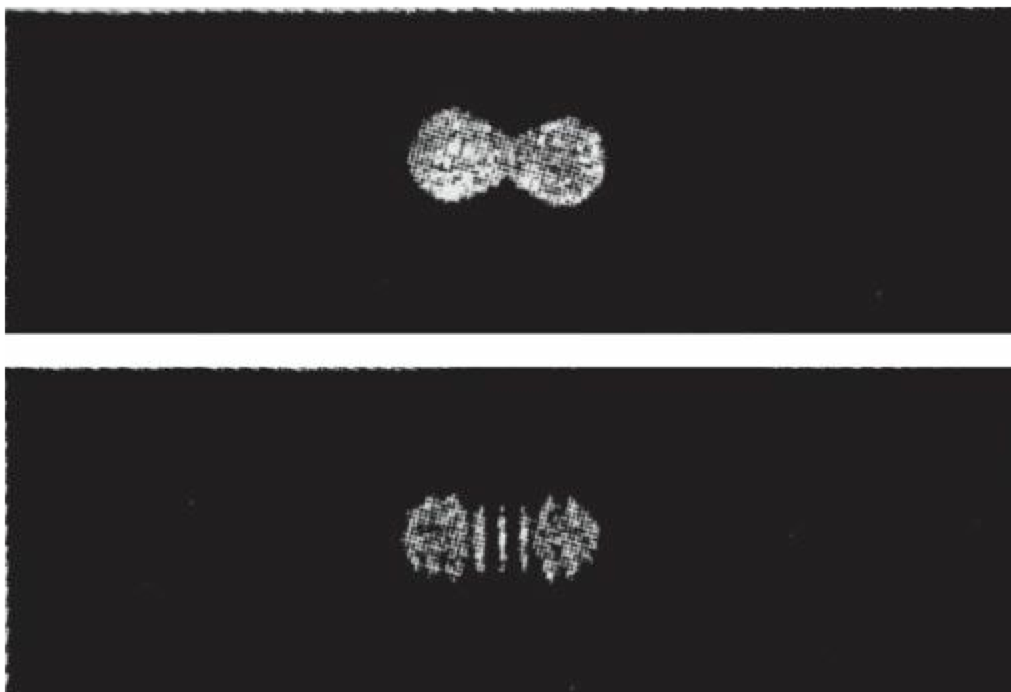
附图Ib 用慢镜头拍摄下来的一个布朗粒子
[布伦伯格（Brumberg）及瓦维洛（Vavilow）摄]



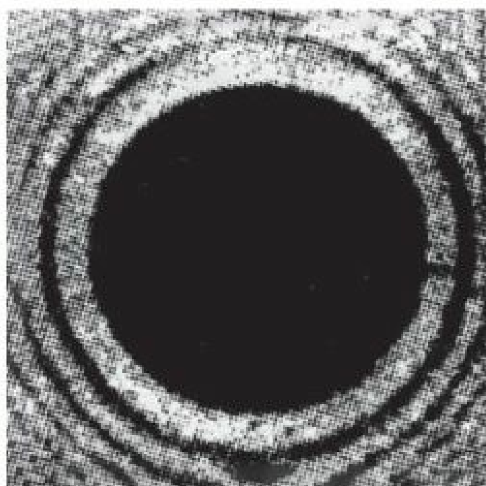
附图Ic 从许多布朗粒子中认定一个粒子进行观察所得到的连续位置



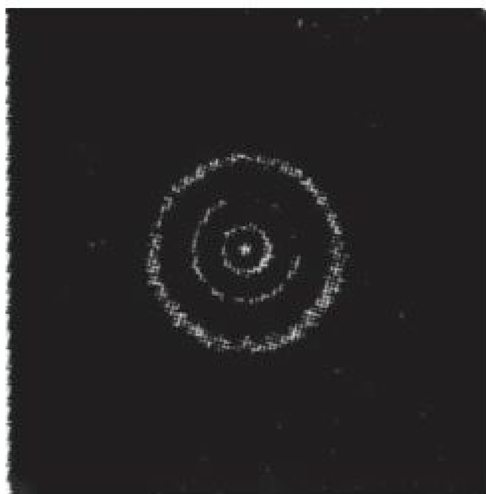
附图Id 从这些连续位置平均出来画成的路径



附图IIa 上面的照片是两束光通过两个紧挨着的小孔后所得到的光斑（先打开一个小孔，然后把它关上再打开另一个）。下面的照片是让光同时通过两个小孔所得到的光带
[V. 阿尔卡迪耶（V. Arkadiev）摄]



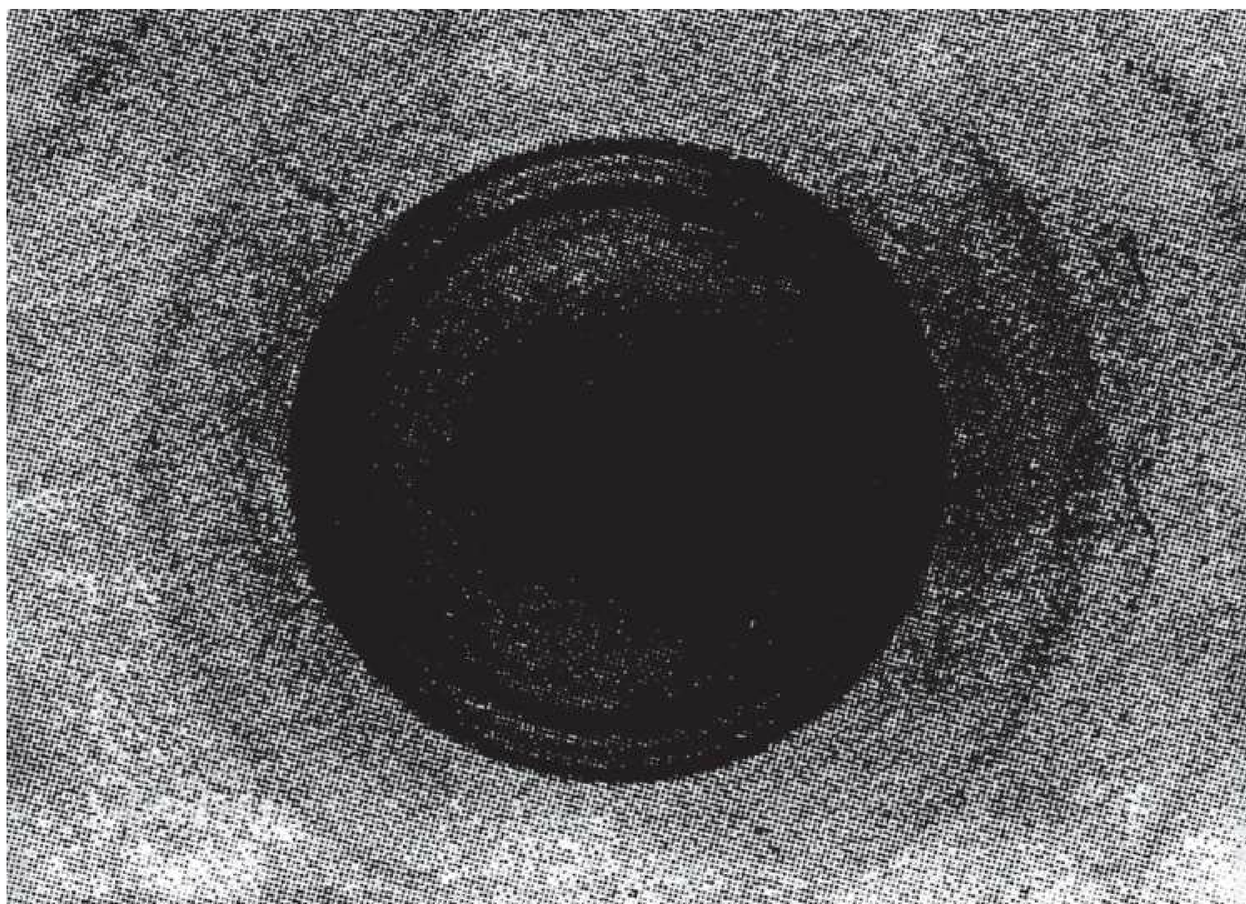
附图IIb 绕过小障碍物的光的衍射
（V. 阿尔卡迪耶摄）



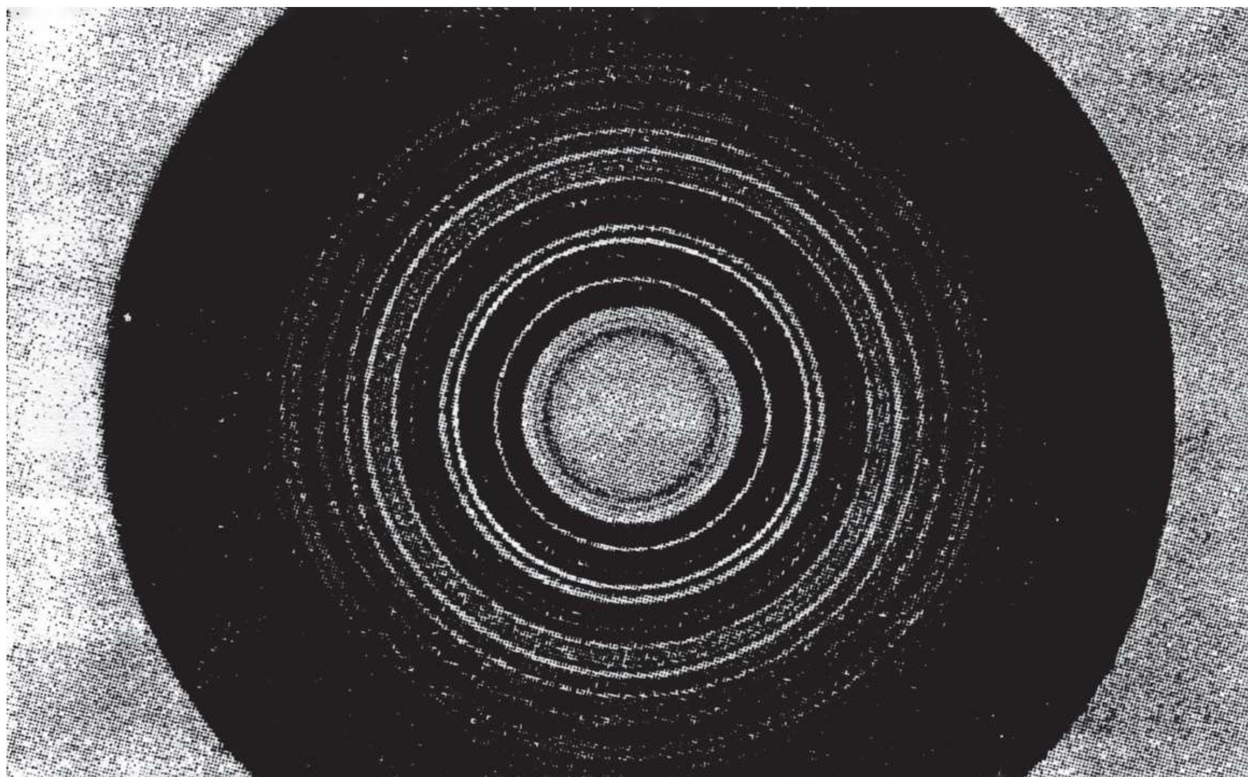
附图IIc 穿过小孔的光的衍射
（V. 阿尔卡迪耶摄）



附图IIIa 光谱线
（A. G．申斯通摄）



附图IIIb 射线的衍射
[拉斯托维金（Lastlowiecki）及格雷戈尔（Gregor）摄]



附图IIIc 电子波的衍射
[圣洛里亚及克林格（Klinger）摄]

---

1. 法新（farthing）：英国1961年以前使用的旧铜币，1法新等于0.25便士。——编者注

致谢

感谢所有在本书准备过程中为我们提供热心帮助的人，特别是：

新泽西州普林斯顿大学的A.G.申斯通（A. G. Shenstone）教授、利沃夫（Lwow）的圣洛里亚（St Loria）为本书附图Ⅲ拍了照片。

I. N. 斯坦伯格（I. N. Steinberg）为本书画了插图。

M.菲利普（M. Phillips）博士阅读了本书的手稿，并提供了非常热心的帮助。